



Het effect van slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde op de waterkwaliteit en slibhuishouding in de Westerschelde

Evaluatie van een bepaling uit de WVO-vergunning onderhoudsbaggerspecie

Auteur: R.M. Salden

Bijdragen: G.T.M. van Eck, A.B.M. Holland, F.O.B. Lefèvre, D.C. van Maldegem, J. de Ridder, G.C. Spronk, A. Schouwenaar, P.A.J. Verlaan

**Rapport RIKZ-98.015
Juli 1998**

Samenvatting	5
1. Achtergrond van de beheersvraag	11
1.1. Inleiding	11
1.2. Hoe is een en ander volgens de WVO-vergunning gedefinieerd	13
1.3. Het cluster "kwaliteit"	14
2. Beschrijving van het watersysteem	17
2.1 Geografische aspecten	17
2.2 Hydrodynamische eigenschappen van het estuarium	18
2.2.1 Het getij	18
2.2.2 De aanvoer van zoetwater	19
2.3 Aanvoer van slib naar de Westerschelde	20
2.4 Karakterisering van het slib in de Westerschelde	22
2.5 De relatie tussen slib en water- en bodemkwaliteit in de Westerschelde	25
2.6 De betekenis van slib voor de ecologie van de Westerschelde	28
3. Ingrepen en veranderingen in het Schelde estuarium met invloed op de slibhuishouding	31
3.1 Ingrepen in de infrastructuur van de Beneden Zeeschelde in de periode '60-'96	31
3.2 Bagger- en stortstrategie	33
3.3 Aanvoer van slib via de rivier de Schelde	34
3.4 Een kort historisch overzicht van de slibhuishouding in de Beneden Zeeschelde	36
4. Beschrijving van de gevolgde aanpak	41
4.1 De methodiek van slibbalans naar waterkwaliteit	41
4.2 Slibbalansen van de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde in de periode '60-'96	43
4.3 Slibbalans representatief voor de periode voor de slibverwijdering (midden jaren tachtig)	45
4.3.1 Balans Verlaan	45
4.3.2 Balans Van Maldegem	46
4.4 Slibbalans van de Beneden Zeeschelde representatief voor de periode '92-'95	46
4.5 De verschillen tussen de balansen op een rijtje	50
4.6 Enkele balanstermen nader beschouwd	50
4.6.1 Uitwisseling van slib tussen de bodem en de waterfase in de Beneden Zeeschelde: de effecten van de slibverwijdering	50
4.6.2 De gevolgen voor de troebelheid in de Westerschelde	53
4.7 Onzekerheden in de balanstermen	54
5. Wat kunnen we opmaken uit bestaande veldgegevens	57
5.1 Het slibpercentage van de drempels in de Beneden Zeeschelde en Westerschelde in de periode '91-'97, een indicatie van de slibinhoud van de Beneden Zeeschelde	57

5.2 De $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding in organisch stof als maat voor de samenstelling van het slib in suspensie.	61
5.3 Het verloop van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding bij Schaar van Ouden Doel in de periode '89-'97	62
5.4 Verhouding tussen de fracties fluviatiel en marien slib in het zwevend stof over de periode '87/'88-'95/'96 bepaald met factor analyse	64
5.5 Verhouding tussen de fluviatiele en mariene fractie in het bodemsediment in de periode '90-'93 bepaald met factor analyse	68
5.5.1 Een vergelijking tussen de periode '75-'85 gebaseerd op de $\delta^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding in het slib en '90-'93 op basis van factoranalyse.	69
5.6 Vergelijking zwevend stof concentraties en fracties tijdens de SAWES campagnes van '87/'88 en '95/'96	70
5.7 Kwaliteitsontwikkeling van het zwevend stof in het Schelde estuarium: een vergelijking tussen de SAWES tochten uit '87-'88 en '95-'96	74
5.8 Andere bronnen van slib	79
5.8.1 Baggerwerkzaamheden op de drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde en in de Beneden Zeeschelde	79
5.8.2 Schorerosie in het oostelijk deel van de Westerschelde	80
5.8.3 De slikken bij Waarde	81
5.8.4 Verbreding van het Kanaal van Zuid-Beveland	81
5.8.5 Andere mogelijkheden	81
6. Validatie van de opgestelde slibbalans aan de hand van veldgegevens	83
6.1 Bevindingen uit de veldgegevens	83
6.1.1 Het beeld op basis van baggercijfers en de slibbalans.	83
6.1.2 Het beeld op basis van veldgegevens	83
6.1.3 Consequenties voor de slibbalans	85
6.2 Modelleren van effecten van slibverwijdering	87
7. Consequenties voor de waterkwaliteit	89
7.1 Ontwikkeling in waterkwaliteit in relatie tot de slibverwijdering	89
7.2 Verschillen in de slibbalans als indicatie voor ontwikkelingen in de waterkwaliteit	90
7.3 Berekeningen met het BOS LIFE model op basis van de geconstrueerde balansen	91
8. Consequenties voor de ecologie	93
8.1 Troebelheid	93
8.2 Slikken & schorren	95
9. Conclusies en aanbevelingen	97
9.1 Conclusies	97
9.2 Aanbevelingen ten aanzien van de jaarlijkse slibbalans van de Afdeling Maritieme Schelde	99
Literatuur overzicht	101

Samenvatting

De haven van Antwerpen is een belangrijke spil in de Vlaamse economie. De toegangsroute naar Antwerpen loopt door de Westerschelde. Om in de toekomst grotere schepen gedurende een langere periode binnen het getij toegang te kunnen verlenen tot Antwerpen, wordt de vaargeul in de Westerschelde de komende jaren verder uitgediept. Vanaf 1985 is, in het kader van de "Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren", door Nederland een vergunning ingesteld voor het terugstorten van baggerspecie op stortlokaties in de Westerschelde. Vanaf het begin van de jaren negentig is in de baggervergunning de bepaling opgenomen dat er jaarlijks een zekere hoeveelheid (vervuild geachte) baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde verwijderd dient te worden. De Beneden Zeeschelde is het deel van het Schelde estuarium dat gelegen is tussen Rupelmonde en de Belgisch-Nederlandse grens.

De achterliggende gedachte is dat verwijdering van baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde de waterkwaliteit in de Westerschelde ten goede zal komen. De grensoverschrijdende contaminantenvracht zal door de maatregel immers afnemen. Volgens opgave van de vergunninghouder, de Afdeling Maritieme Schelde van het Ministerie van Leefmilieu van de Vlaamse Gemeenschap, is in de periode '92-'94 twee miljoen ton droge stof aan baggerspecie definitief verwijderd uit het systeem. Deze baggerspecie is afkomstig uit de toegangsgeul naar de Kallosluis en uit de haven-dokken gelegen achter de Zandvliet en Berendrecht sluizen en is geborgen in onderwatercellen in de Waaslandhaven of opgespoten op land. Vanaf '95 is de zogenaamde verdiepingswet van kracht. In de periode '95-'97 dient jaarlijks driehonderdduizend ton droge stof verontreinigde baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde verwijderd te worden. Om een besluit te kunnen nemen over een eventuele aanpassing van de grootte van deze slibverwijdering na 1997, wil Directie Zeeland medio 1998 geïnformeerd worden omtrent de vraag of deze maatregel zinvol is met het oog op verbetering van de waterkwaliteit.

De waterkwaliteit in de Westerschelde wordt bepaald door de concentraties van verschillende stoffen in het water en de gehalten in het sediment. De waterkwaliteit is het resultaat van verspreiding van contaminanten vanuit verschillende bronnen door het estuarium middels het transport van water en slib. Stoffen die opgelost zijn in water zullen uiteindelijk met het rivierwater naar zee afgevoerd worden. De verversingstijd van het water wordt bepaald door het rivierdebiet en de menging met zeewater als gevolg van getijstroming. Slib wordt in suspensie met het water mee getransporteerd. Een essentieel verschil met het transport van water is dat slib kan bezinken. Als gevolg van golfwerking en getijstroming kan het gesedimenteerde slib weer opgewerveld worden en naar elders worden getransporteerd. Een belangrijke rol in het transport van slib speelt de getij-asymmetrie in de Westerschelde. Omdat de vloedperiode korter is, maar gepaard gaat met hogere stroomsnelheden, is de hoeveelheid slib die tijdens vloed getransporteerd wordt groter dan tijdens eb. Het netto effect is dat er transport van slib vanaf zee tegen de richting van het rivierdebiet in naar de Westerschelde en naar de Beneden Zeeschelde plaatsvindt. Menging van rivierslib met zeeslib zorgt ervoor dat de gehalten van stoffen

die vanaf de rivier afkomstig zijn in zeewaartse richting afnemen. De fractie rivierslib is in veel gevallen een eerste maat voor de gehalten aan contaminanten. Zolang het rivierslib door lozingen in het stroomgebied van de Schelde niet aan de norm voor verspreiding van baggerspecie in zoute wateren voldoet, zal de aanwezigheid van rivierslib nadelige gevolgen hebben voor de waterkwaliteit in het estuarium. De waterkwaliteit in de Westerschelde wordt mede bepaald door de gehalten contaminanten in rivierslib en door de grootte van het transport van rivierslib vanaf de Schelde naar de Westerschelde. De hamvraag is hoe dit transport beïnvloed wordt door de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde.

De kwaliteit van het slib dat de afgelopen veertig jaar aangevoerd is, is slecht. De effecten van dit slib op het ecosysteem moeten als negatief beoordeeld worden. Naast de negatieve aspecten verbonden met de aanwezigheid van dit slib, vervult slib in het algemeen in de Westerschelde een positieve rol in het functioneren van het ecosysteem. Enerzijds is het organisch stof dat met de slibdeeltjes meegevoerd wordt een belangrijke voedselbron in het ecosysteem. Anderzijds zijn de slibrijke slikken en schorren aan de randen van het estuarium unieke habitats voor verschillende plantensoorten en (bodem)dieren. De verwijdering van slib dient daarom beperkt te blijven tot het vervuilde materiaal.

De laatste jaren hebben industriële ontwikkelingen in het Schelde stroomgebied elkaar in hoog tempo opgevolgd maar is tevens het besef tot een duurzaam gebruik van het watersysteem gegroeid. Reducties van emissies van contaminanten aan de bronnen zijn de waterkwaliteit ten goede gekomen. Tevens worden er steeds meer Riool Water Zuiverings Installaties (RWZI) in Vlaanderen in gebruik genomen. Wanneer ook de stad Brussel haar afvalwater gaat zuiveren, zal de waterkwaliteit naar verwachting nog verder verbeteren.

Van belang voor de slibhuishouding is de afgenomen aanvoer van rivierslib uit het Schelde bekken naar de Beneden Zeeschelde. Vanwege de verspreide bebouwing is het in Vlaanderen praktisch onmogelijk alle huishoudens op een RWZI aan te sluiten. Via de riolering wordt naast huishoudelijk afvalwater ook een deel van het polderwater afkomstig van agrarische gebieden afgevoerd naar een RWZI. Hier wordt ca. 90% van het slib dat in dit water aanwezig is in de RWZI's verwijderd. Een andere oorzaak is de verwijdering van slib uit de vaarwegen op diverse plaatsen in het bovenstroomse deel van de Schelde. Daarnaast kunnen we nog de introductie van wachtbekkens noemen die een meer gecontroleerde afvoer van rivierwater mogelijk maken in periodes met overvloedige neerslag. De wachtbekkens zijn zowel gelegen op de onbevaarbare waterlopen als in het bevaarbare deel van het estuarium. Het slib dat met het rivierwater meegevoerd wordt krijgt de kans in deze bekkens te bezinken en wordt later definitief verwijderd. Tenslotte zorgt een andere ploegtechniek in de landbouw voor een vermindering van landerosie.

Als gevolg van verschillende aanpassing aan de hoofd-stroomgeul en de infrastructuur in de Beneden Zeeschelde, hebben zich wijzigingen voorgedaan in het transport van slib in dit deel van het estuarium. Van groot belang voor de slibhuishouding in de Beneden Zeeschelde is de aanleg van havendokken en toegangsheulen naar de zeesluizen bij Kallo en Zandvliet/Berendrecht geweest.

Het op diepte houden van de drempels in het estuarium ten behoeve van de scheepvaart, kan niet onvermeld blijven. Het veelvuldig baggeren op de drempels rond de Belgisch-Nederlandse grens houdt het sediment mobiel en maakt het mogelijk dat de fijne slibdeeltjes uit kunnen spoelen. Deze

maatregelen zijn in kaart gebracht en er is een inschatting gemaakt van de effecten die deze ingrepen hebben gehad op het transport van slib in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens. Op grond van de ontwikkeling van het slibpercentage op de drempels, concluderen we dat er bij de baggerwerkzaamheden een beperkte hoeveelheid slib in suspensie kan zijn geraakt. Deze hoeveelheid is echter verre van toereikend om de sedimentatie in de toegangseulen naar de sluiscomplexen in de Beneden Zeeschelde te verklaren.

Duidelijk is dat er veel maatregelen hebben plaatsgevonden in het estuarium die de waterkwaliteit en de slibhuishouding gunstig beïnvloed hebben. Het is daarom niet eenvoudig de bijdrage van de slibverwijdering aan verbetering van de waterkwaliteit en aan de wijziging van het slibtransport rond de Belgisch-Nederlandse grens te identificeren. Omdat slib het transport van contaminanten grotendeels bepaalt, richten we ons in eerste instantie op de veranderingen in de slibbalans als gevolg van de slibverwijdering. In een slibbalans wordt het jaarlijks netto transport van rivier- en zeeslib weergegeven, zoveel mogelijk gebaseerd op veldgegevens. We hebben de beschikking over gegevens van de slibaanvoer via de Schelde, baggerhoeveelheden in de sluiscomplexen langs de Beneden Zeeschelde, de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding in het organisch stof, welke een maat is voor de verhouding tussen de fracties fluviatiel en marien slib en het slibpercentage in de waterbodem. Op basis van gegevens over de periodes '64-'86 en '92-'96, zijn twee slibbalansen voor de Beneden Zeeschelde opgesteld zoveel mogelijk gebruik makend van identieke randvoorwaarden. De verschillen tussen beide balansen kunnen zo grotendeels aan de slibverwijdering uit de periode '92-'96 toegeschreven worden.

Het meest opvallende verschil tussen de twee slibbalansen is de rol die de bodem speelt. In de periode '64-'86 is sprake van een toename van de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde (als geheel gezien), terwijl in de periode '92-'96 een flinke afname wordt geconstateerd. Deze afname is het netto effect van erosie en sedimentatie van slib. Met erosie van slib uit de bodem bedoelen we het "uitspoelen" van slib uit het zandige sediment door de microdynamiek van de bodem, zonder dat dit morfologische consequenties heeft. De bodemligging of diepte van geulen wordt constant verondersteld. Met sedimentatie wordt het tegenovergestelde mechanisme aangeduid, waarbij als gevolg van de bodemdynamiek slib in het zandige sediment wordt "ingevangen". De hydrodynamische en morfodynamische processen verantwoordelijk voor de erosie van slib worden verondersteld niet wezenlijk anders te zijn dan in de periode '64-'86. De intensiteit is hoogstens wat gewijzigd. De sedimentatie echter vindt momenteel grotendeels in de toegangseulen naar de zeesluizen plaats, van waaruit het slib nu niet meer teruggeschoven wordt in de vaargeul, maar definitief wordt verwijderd uit het systeem (Kallo). De bodem verliest slib door erosie en de slibvoorraad wordt, als gevolg van de afgenomen sedimentatie, niet meer aangevuld. Het slib dat in het verleden in de bodem van de Beneden Zeeschelde is geaccumuleerd, komt momenteel door de slibverwijdering versneld weer in het watersysteem terecht. Er is een transport ontstaan van slib uit de bodem via het water naar de toegangseulen tot de zeesluizen. Verwijdering van slib uit de toegangseulen betekent in wezen verwijdering van slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde.

Het transport van nieuw aangevoerd rivierslib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde wordt echter maar weinig beïnvloed door de slibverwijdering. Grofweg kan gesteld worden dat de fijnste slib-

fractie deels in suspensie met het rivierwater naar de Westerschelde wordt afgevoerd en maar in beperkte mate in de Beneden Zeeschelde sedimenteert. De slibverwijdering heeft weinig invloed op het transport van deze fijne fractie. De iets grovere fractie sedimenteert in de periode voor slibverwijdering bijna volledig in de gehele Beneden Zeeschelde en concentreert zich nu in de toegangsgeulen naar de zeesluizen bij Kallo en Zandvliet. De uitwisseling van slib met de bodem is de sluitpost in de balans over '92-'96 en is met behulp van veldgegevens zo goed mogelijk gevalideerd.

De veldgegevens die we tot onze beschikking hebben liggen zowel op chemisch als op fysisch terrein. Ontwikkelingen in veldparameters zijn naast de veranderingen in de slibbalans gelegd. Aandacht is achtereenvolgens besteed aan het slibpercentage in de drempels rond de Belgisch-Nederlandse grens, de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding in het organisch stof, factoranalyse (een andere methode om fluviatiel en marien slib te kunnen onderscheiden), de korrelgrootte verdeling in het slib en tenslotte de gehalten spoormetalen en organische microverontreinigingen in het zwevend stof voor- en nadat slibverwijdering heeft plaatsgevonden. Het gemiddelde slibpercentage op de drempels blijkt in de periode '90-'97 te zijn gehalveerd, hetgeen een aanwijzing is dat uit de bodem van de Beneden Zeeschelde slib is geërodeerd. Een definitieve bevestiging van de sliberosie is mogelijk wanneer de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde nogmaals bepaald wordt volgens de methode die eerder door Bastin in '64 en '86 is gehanteerd. Vergelijking van de huidige situatie met eerdere opnames kan de ontwikkeling van de slibvoorraad in de bodem van de gehele Beneden Zeeschelde beter aan het licht brengen. Vergelijking van zwevend stof monsters uit '87 en '95 op gehalten spoormetalen en organische microverontreinigingen geeft in '95 lagere gehalten te zien in het gebied bovenstrooms van Antwerpen. De lagere gehalten zijn het gevolg van emissie reducties in het stroomgebied van de Schelde. Op het traject vanaf de Belgisch-Nederlandse grens tot aan Hansweert is van deze lagere gehalten nauwelijks meer iets merkbaar. De gehalten voor alle onderzochte stoffen liggen in '95 rond het niveau dat in '87 waargenomen is, soms zelfs iets hoger.

Deze ontwikkeling in gehalten contaminanten in zwevend stof nabij de Belgisch-Nederlandse grens, wordt veroorzaakt doordat slib dat in het verleden is afgezet in de bodem van de Beneden Zeeschelde met een hogere verontreinigingsgraad momenteel versneld wordt opgewerveld door de slibverwijderingsmaatregel. Het relatieve aandeel oud slib dat wordt opgewerveld uit de bodem is groter dan in het verleden. Een deel van dit slib wordt naar de Westerschelde getransporteerd en doet het positieve effect van emissie reducties in het bovenstroomse deel van de Schelde op de waterkwaliteit teniet. Het resterende slib sedimenteert in de toegangsgeul naar de Kallosluis en in de havendokken bij Zandvliet/Berendrecht en wordt van hieruit deels uit het watersysteem verwijderd. Slibverwijdering betekent hierdoor in feite een sanering van de bodem van de Beneden Zeeschelde. De duur van de periode waarover slibverwijdering de waterkwaliteit in de Westerschelde negatief beïnvloedt, hangt af van de gehalten in het resterende slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde en de omvang van de voorraad oud slib. Ook de hoeveelheid slib die jaarlijks verwijderd wordt als verplichting voortkomend uit de WVO-vergunning speelt hierin een rol.

Voor het ecologisch functioneren van het estuarium is de aanwezigheid van een zekere hoeveelheid (schoon) slib gewenst. De voornaamste fysische parameters voor het ecosysteem van de Westerschelde zijn troebelheid,

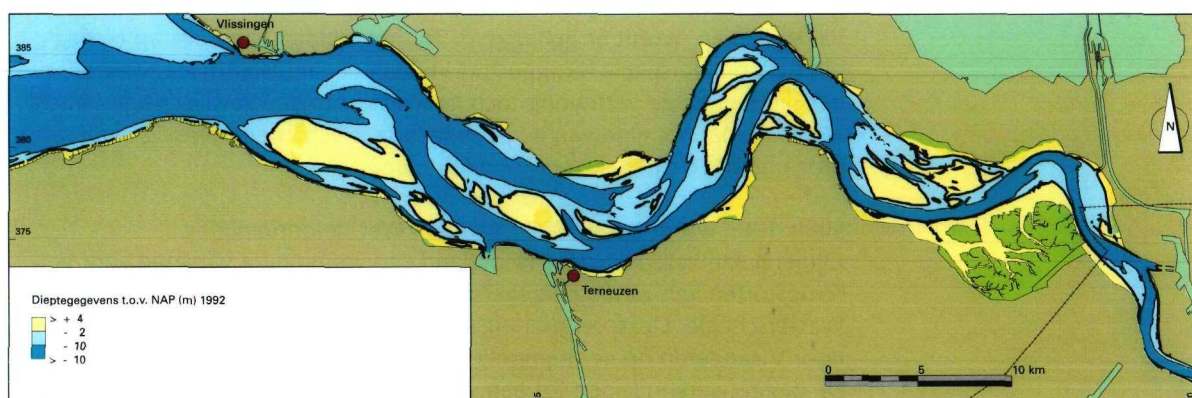
slibgehalte in de bodem en sedimentatiesnelheid van slikken en schorren. De slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde lijkt weinig gevolgen te hebben voor de troebelheid in de Westerschelde. Omdat de aangroei van schorren in grote mate bepaald wordt door de slibconcentratie van het overstromende water, lijken ook significante gevolgen voor schorvorming in de Westerschelde uitgesloten te mogen worden.

1. Achtergrond van de beheersvraag

1.1 Inleiding

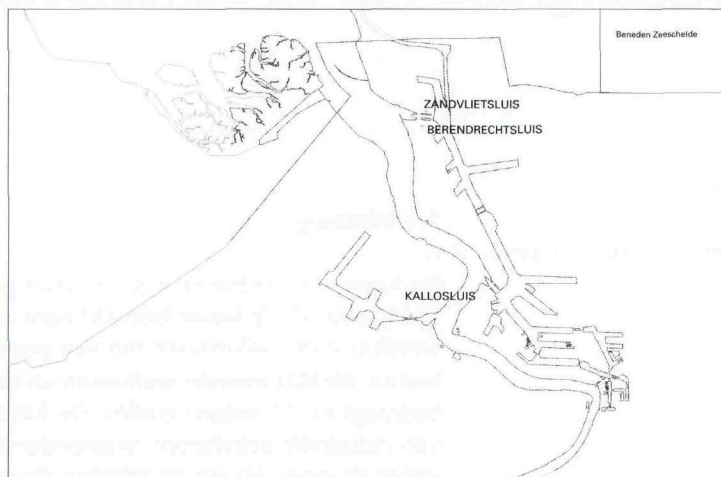
De haven van Antwerpen is een belangrijke spil in de Vlaamse economie. Jaarlijks wordt de haven bezocht door een groeiend aantal schepen en wordt er ruim 100 miljoen ton aan goederen overgeslagen. Er zijn momenteel ca. 60.000 mensen werkzaam en de jaarlijkse economische waarde bedraagt ca. 11 miljard gulden. De haven biedt plaats aan een breed scala van industriële activiteiten, waaronder chemie, staal en auto industrie. Vanaf de jaren '60 zijn de schepen die toegang zoeken tot de haven van Antwerpen sterk in omvang toegenomen. Om haar positie als een van de grootste havens van Europa te handhaven is het voor Antwerpen een grote noodzaak de toegankelijkheid van de haven voor deze schepen te garanderen. Ten behoeve hiervan is de vaargeul in de Westerschelde en in de Beneden Zeeschelde lokaal van ondiepten ontdaan.

Figuur 1.1.: Geometrie van de Westerschelde



De vaargeul is het afgelopen jaar verder uitgediept om in de toekomst grotere schepen gedurende een langere periode binnen één getij toegang te kunnen verlenen tot Antwerpen. Naast de vaargeul is de behoefte tot grotere overslagcapaciteit aanleiding geweest om een aantal nieuwe havendokken aan te leggen op de linker- en de rechteroever van de rivier de Schelde. De aanleg van deze havendokken vanaf het begin van de jaren zestig in de Beneden Zeeschelde, heeft geleid tot veranderingen in de slibhuishouding van het Schelde estuarium. De belangrijkste wijzigingen die in de geometrie van de Beneden Zeeschelde hebben plaatsgevonden, zijn de aanleg van de Zandvliet- en Berendrechtshuis op de rechteroever (1967/1988) en de Waaslandhaven met de Kallosluis op de linkeroever van de Schelde (aanleg jaren zeventig). De sluizen vormen de verbinding tussen de havens en de Beneden Zeeschelde. Vanuit de sluizen kan de vaargeul via een toegangsgeul bereikt worden.

.....
 Figuur 1.2.: Havendokken en zeesluizen
 in de Beneden Zeeschelde



De stroomsnelheden in de relatief diepe toegangsgeulen tot de havendokken zijn over het algemeen laag ten opzichte van de stroomsnelheid op de rivier, waardoor deze geulen slib zijn gaan invangen uit het rivierwater. Een groot deel van het slib dat voorheen in suspensie vanaf de rivier de Schelde via de Beneden Zeeschelde de Westerschelde bereikte, sedimenteert nu in de toegangsgeulen. Bij het schutten van de sluizen verdwijnt een deel daarvan naar de havendokken zelf. Omdat de havens en geulen op diepte gehouden dienen te worden met het oog op de toegankelijkheid van de havendokken, wordt er gebaggerd. Tot het midden van de jaren tachtig werd de baggerspecie teruggestort in de Beneden Zeeschelde, waardoor het slib met enige vertraging toch gedeeltelijk in de Westerschelde terecht kwam. Vanaf het eind van de jaren tachtig is echter een omslag in de omgang met de baggerspecie opgetreden.

Sinds 1985 wordt in het kader van de "Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren" door Nederland een vergunning verlangd voor het terugstorten van zandige baggerspecie op stortlokaties in de Westerschelde. Deze vergunning heeft betrekking op baggeractiviteiten die door Vlaanderen op de drempels in de Westerschelde worden uitgevoerd. De baggerwerken leiden tot een verstoring van het natuurlijk sediment transport. Geul-plaat systemen worden vastgelegd waardoor de dynamiek vermindert. Deze verminderde dynamiek gaat gepaard met een afname van de ecologische waarden in het estuarium. De platen groeien, slikken verlagen en de schorren verouderen. Er ontstaan geen jonge schorren en het ondiepwaterareaal in de Westerschelde neemt af [Vroon et al., 1997]. Daarnaast is het slib dat via de rivier de Schelde uit het Vlaamse achterland wordt aangevoerd sinds lange tijd sterk vervuild. Verspreiding van dit slib naar de Westerschelde is onwenselijk met het oog op de water- en bodemkwaliteit. Dit heeft ertoe geleid dat vanaf het begin van de jaren '90 in de baggervergunning de bepaling is opgenomen dat er jaarlijks een zekere hoeveelheid (vervuild geachte) baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde verwijderd dient te worden. Verwijdering van dit slib in de Beneden Zeeschelde komt de waterkwaliteit van de Westerschelde ten goede zolang het kwaliteitsverschil aanwezig is. De reductie van emissies van stoffen in het Schelde stroomgebied kan de kwaliteit van het Schelde slib echter doen verbeteren.

1.2 Hoe is een en ander volgens de WVO-vergunning gedefinieerd

In de WVO-vergunning voor het onderhoudsbaggerwerk, afgegeven over de periode 28 november 1991 tot 1 januari 1995, is de verwijdering van baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde door de Afdeling Maritieme Schelde van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (AMS), voor het eerst als verplichting vastgelegd. Dit kwam als volgt tot uiting:

"teneinde de water - en bodemkwaliteit in het Schelde Estuarium te verbeteren dient in de periode '92-'94 in het totaal 1.3 miljoen ton baggerslib uit de Beneden Zeeschelde verwijderd te worden".

Prioriteit werd gegeven aan de verwijdering van de baggerspecie uit de toegangsgeul naar de Kallosluis waarvan de vervuilingsgraad het hoogst was. Ook praktisch gezien was deze lokatie uiterst geschikt: het slib was in grote hoeveelheden erg geconcentreerd aanwezig en de afstand tot het opslaggebied was maar kort. Volgens opgave van de AMS is in de periode '92-'94 2 miljoen ton droge stof aan baggerspecie definitief verwijderd uit de toegangsgeul naar de Kallosluis en geborgen in onderwatercellen van de Waaslandhaven. Daarnaast is in deze periode een kleine miljoen ton baggerspecie afkomstig uit de havendokken gelegen achter de Zandvlietsluis geborgen of opgespoten op land. De vergunninghouder (AMS) is volgens de vergunning verplicht jaarlijks een slibbalans van de Beneden Zeeschelde op te stellen, waarin opgenomen is wat de gebaggerde hoeveelheden specie zijn, hoe groot de slibverwijdering per locatie heeft bedragen en hoe groot de slibvracht naar de Westerschelde dat jaar is geweest.

Op 4 november 1994 is door de Minister van Verkeer en Waterstaat aan de Vlaamse regering vergunning verleend in het kader van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren (WVO), over de periode 1 januari 1995 tot en met 31 december 2000 baggerspecie terug te storten in het oppervlaktewater van de Westerschelde [Rijkswaterstaat]. Dit is vastgelegd in de "verdiepingswet". Krachtens artikel 7 van deze vergunning is geregeld dat de AMS in de periode '95-'97 jaarlijks driehonderdduizend ton droge stof verontreinigde baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde verwijdert. Ook in deze vergunning is aan verwijdering van baggerspecie uit de toegangsgeul naar de Kallosluis de meeste prioriteit gegeven ¹. In '95 heeft de AMS niet aan haar verplichtingen voortkomend uit de vergunning kunnen voldoen, vanwege een door de Vlaamse regering geïnitieerde Milieu Effect Rapportage (MER). Rijkswaterstaat Directie Zeeland - de beheerder van de Westerschelde - heeft deze onderbreking gedoogd, mits de opgelopen achterstand wordt ingehaald. Medio '96 is de verwijdering van baggerspecie weer opgepakt wat heeft geresulteerd in een verwijdering van ruim 400 duizend ton droge stof uit de toegangsgeul naar de Kallosluis in '96.

In artikel 7 van vergunning is tevens vastgelegd dat in 1997 de bepaling die betrekking heeft op de slibverwijdering geëvalueerd zal worden. Om een besluit te kunnen nemen over een eventuele aanpassing van de groot-

.....
¹ Voor de beheerder van de Beneden Zeeschelde, de Afdeling Maritieme Schelde (AMS) van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, was de verwijdering van slib uit de Beneden Zeeschelde eveneens wenselijk. De AMS wilde deze slibverwijdering ter verbetering van de efficiëntie van het baggerwerk. Het "sweep-beam baggeren" in de Beneden Zeeschelde leidde tot het herhaaldelijk "rondpompen" van baggerspecie tussen de havenwerken en de stroomgeul in de Beneden Zeeschelde. Verwijdering van baggerspecie verlaagt de frequentie waarmee gebaggerd dient te worden. Daarnaast gaf het hoge slibpercentage in het sediment van de drempels problemen bij afzet op de markt.

te van de slibverwijdering na 1997, wil Directie Zeeland uiterlijk begin 1998 geïnformeerd worden omtrent de vraag of deze maatregel zinvol is met het oog op de waterkwaliteit. De bepaling van de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde is immers opgenomen in de WVO-vergunning onderhoudsbaggerwerk teneinde de waterkwaliteit in de Westerschelde te verbeteren.

In dit rapport zal op basis van de baggerhoeveelheden, veldgegevens van de sedimentsamenstelling en sedimentherkomst en van een aantal waterkwaliteitsparameters in de afgelopen jaren, een inschatting gemaakt worden van de bijdrage die de slibverwijdering in de periode '92-'96 heeft geleverd aan de ontwikkeling van de waterkwaliteit in de Westerschelde. De conclusies die aan de gegevensanalyse verbonden worden kunnen door de Directie Zeeland meegenomen in de besluitvorming ten aanzien van de continuering van de verwijdering van baggerspecie uit de Beneden Zeeschelde.

1.3 Het cluster "kwaliteit"

De vraag om dit rapport dateert van enige jaren geleden. De vraag is destijds ondergebracht in het project SCHOON. Het was toen gebruikelijk alle produkten te verbinden aan Maatschappelijke vragen. Het doel van het project SCHOON was gedefinieerd als: Het geven van het antwoord op de maatschappelijke vraag. "Hoe krijgen we de Westerschelde schoon?"

Met de produkten van het project SCHOON wordt RWS directie Zeeland geïnformeerd en geadviseerd over de te kiezen beheers- en beleidsstrategie ten aanzien van de Westerschelde.

Inmiddels hanteert RIKZ voor de beantwoording van vragen van de klant geen projectstructuur meer. Er wordt op produktniveau gewerkt, met per produkt een produktleider. De produkten die vroeger onder het project SCHOON vielen, zijn nu ondergebracht in het cluster "(water- en bodem-) kwaliteit" van het Klantenplan Zeeland.

In het cluster "kwaliteit" werken de volgende personen samen, met elk hun eigen specialiteit:

Bert van Eck: produktleider met een brede inbreng in de geochemische aspecten en de modelbenaderingen van de Westerschelde

Albert Holland: clusterleider en produktleider, inbreng op het vlak van water- en bodemchemie.

Belinda Kater: heeft tot medio 1997 meegewerkt aan, onder andere, ontwikkeling van het WKMSE (Water Kwaliteits Model Schelde Estuarium)

Frits Lefèvre: produktleider, uitvoering scenario-berekeningen en inbreng op het vlak van waterkwaliteit en -kwantiteit.

Dirk van Maldegem: produktleider, slib- en slibtransport deskundigheid.

Anja Phernambucq: produktleider, gespecialiseerd in diffuse stoffen, bestrijdingsmiddelen.

Roger Salden: hoofdauteur van het rapport, vanwege zijn specialisatie op het gebied van modelbenadering van slib en deskundigheid ten aanzien van slibkwaliteit

Bram Schouwenaar: secretaris van het cluster Kwaliteit, inventarisatie emissies en immissies, verwerking en analyse water- en bodemkwaliteit met GIS.

Gerard Spronk: uitvoering en kwaliteitsborging van chemische- en fysische analyses die ten behoeve van het cluster Kwaliteit door of voor RIKZ worden uitgevoerd

Gillis Wattel: inbreng gebiedskennis, inventarisatie emissies en immissies, data-inwinning en -analyse met DONAR.

De voortgang van het rapport is continu onderwerp van gesprek geweest tijdens de bijeenkomsten van het cluster "kwaliteit". De bijdragen van verschillende clusterleden zijn in dit rapport verwerkt. De kritische doch opbouwende kanttekeningen die in de loop van het onderzoek zijn geplaatst, hebben de kwaliteit van dit rapport aanzienlijk verbeterd.

.....
Bepaling in de WVO-vergunning voor
het onderhoudsbaggerwerk betrekking
hebbend op de slibverwijdering in de
Beneden Zeeschelde

Artikel 6

1. Na verloop van een jaar vanaf de datum van het ingevolge van deze wet van kracht worden van de vergunning en telkens in de maand juni van het daarop volgende kalenderjaar legt de vergunninghouder een slibbalans van de Beneden Zeeschelde over aan de hoofdingenieur-directeur met daarbij aangegeven:
 - de aanvoer van riviërslib en gegevens over bagger- en stortactiviteiten en saneringsmaatregelen bovenstrooms van Rupelmonde die deze aanvoer kunnen beïnvloeden;
 - de kwaliteit van de bodem van de sedimentatiegebieden in zowel de Beneden Zeeschelde als de havendokken;
 - de hoeveelheden slib die worden geborgen in de daarbij behorende lokaties.
2. Voor de periode 1995-1997 en de periode 1998 tot en met 2000 legt de vergunninghouder in de maand juni van het kalenderjaar volgend op deze perioden gegevens over aangaande:
 - aanslibbingssnelheden c.q. profielveranderingen in de toegangsgeulen;
 - actuele slibvoorraden in de Beneden Zeeschelde;
 - verhouding marlen/fluviatiel slib in de Beneden Zeeschelde inclusief de havendokken.

Artikel 7

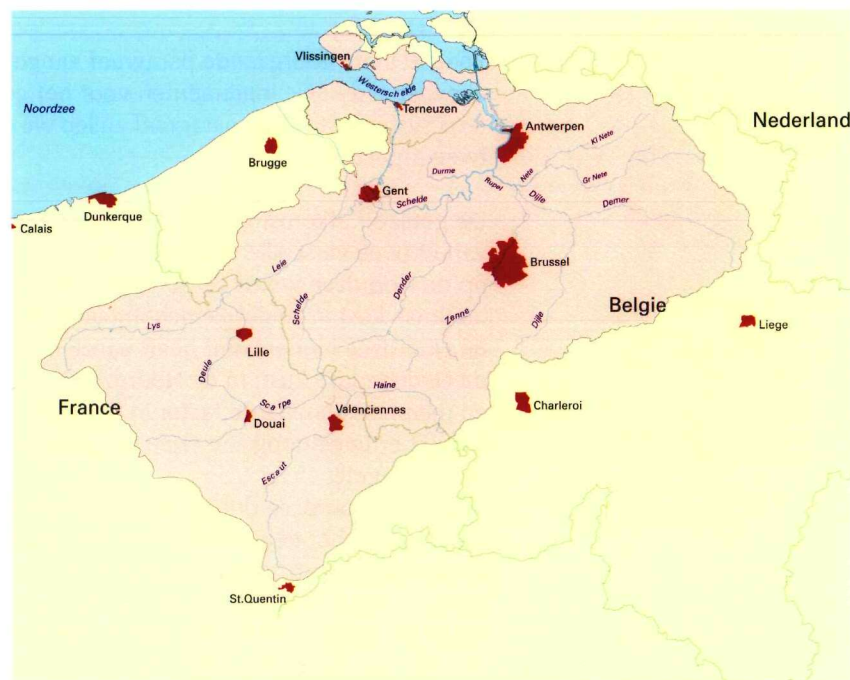
1. De vergunninghouder verwijdert in de periode 1995 tot en met 2000 jaarlijks tenminste 300 duizend ton droge verontreinigde specie uit de Beneden Zeeschelde.
2. De specie, bedoeld in het eerste lid, wordt geborgen op een met de Beneden Zeeschelde niet in open verbinding staande plaats, zodanig dat daarvan geen nadelige beïnvloeding van het watersysteem van de Westerschelde plaatsvindt.
3. De vergunninghouder verleent prioriteit aan het verwijderen van het meest verontreinigde slib, met name van de specie uit de toegangsgeul naar de Kallosluis.
4. Indien in 1997, of navolgende jaren waarvoor de vergunning geldt, uit de slibbalans, bedoeld in het eerste lid van artikel 6, dan wel uit meetresultaten blijkt dat de in het eerste lid genoemde jaarlijkse hoeveelheid voor de periode 1998 tot en met 2000 dan wel voor de resterende periode kan worden verlaagd (of eventueel moet worden verhoogd), maakt de hoofdingenieur-directeur dit de vergunninghouder zo spoedig mogelijk bekend.

2. Beschrijving van het watersysteem

2.1 Geografische aspecten

Het Schelde estuarium is een van de langste resterende estuaria van Europa. De afstand tussen de monding van het estuarium bij Vlissingen en de stuw bij Gent, waar het estuarium overgaat in een rivierregiem, bedraagt zo'n 160 km. In de bepaling van de lengte van het estuarium ligt tevens de definitie van estuarium besloten die wij hanteren. We verstaan onder een estuarium dat deel van de rivier waar de invloed van het getij merkbaar is. De invloed van het getij is in de huidige situatie merkbaar tot in Gent, alwaar sluiscomplexen verdere doordringing van het getij onmogelijk maken. Centraal staan dus de aanwezigheid van zoetwater en getij(stroming). De definitie van estuarium is niet eenduidig vastgelegd. Vaak wordt onder een estuarium een zeearm verstaan waarin zoet- en zoutwater met elkaar vermengd zijn [Fettweis et al., 1997]. Voor het Schelde estuarium, waar de invloed van het getij tot ver op de rivier nog merkbaar is, zou deze definitie betekenen dat de grens van het estuarium in de buurt van Rupelmonde komt te liggen. Het zoetwaterestuarium wordt hierdoor uitgesloten. Ons inziens is deze definitie te beperkend.

Figuur 2.1.: stroomgebied van de Schelde



De rivier de Schelde ontspringt in Frankrijk. Bij Dendermonde mondt de Dender uit op de Schelde. De Zenne (stroomt door Brussel), Dijle, Demer, Grote en Kleine Nete komen samen in de Rupel, welke in Rupelmonde samenkomt met de Schelde. Vanaf Rupelmonde wordt gesproken van Beneden Zeeschelde. Tussen Rupelmonde en de Belgisch-Nederlandse grens wordt nog een hoeveelheid afvalwater geloosd op de Beneden Zeeschelde. Deze hoeveelheid bedraagt ca. 12% van het zoetwaterdebiet van de Rupel [Holland & Smit, 1994]. Bij de grens krijgt het estuarium de

naam Westerschelde.² Het wateroppervlak van de Westerschelde bedraagt, afhankelijk van de getijfase rond de 300 km².

Stroomopwaarts van de Belgisch-Nederlandse grens is het estuarium als een (getij)rivier te beschouwen. Er is in dit gedeelte sprake van één stroomgeul. In de Westerschelde zijn er als gevolg van de interactie van eb- en vloedwerking met de breedte van het stroombed meerdere stroomgeulen ontstaan (scharen). De stroomgeulen in de Westerschelde zijn onder te verdelen in eb-gedomineerde en vloed-gedomineerde geulen. De geulen in het estuarium worden geflankeerd door ondiepwatergebieden, platen, schorren en slikken. Platen, schorren en slikken zijn die delen van het estuarium, die als gevolg van de dynamiek veroorzaakt door het getij (dubbel-daags en springtij - doodtij cyclus) gedurende enige tijd droogvallen. Ook stormen zijn verantwoordelijk voor een deel van de dynamiek in de Westerschelde.

Als gevolg van deze dynamiek in het estuarium en de brakwaterzone die door geleidelijke overgang van zoet naar zout water aanwezig is, heeft het Schelde estuarium een unieke ecologische functie waarin een grote variëteit aan flora en fauna gedijt.

2.2 Hydrodynamische eigenschappen van het estuarium

Het transport van slib vindt in de Westerschelde hoofdzakelijk in suspensie plaats. Voor een goed begrip van het slibtransport in het estuarium, wordt in deze paragraaf een beschrijving gegeven van de relevante transportprocessen in het water.

2.2.1 Het getij

Zoals al in de voorgaande paragraaf aangegeven is, zijn getij en zoetwater aanvoer essentiële ingrediënten voor het goed functioneren van het (eco)systeem. In deze paragraaf zullen we daarom even stilstaan bij deze twee aspecten.

De getijgolf afkomstig uit de Atlantische oceaan betreedt de Noordzee vanuit twee verschillende richtingen. De voornaamste bijdrage aan het getij op de Noordzee wordt veroorzaakt door de tak die om Schotland buigt en de Britse kust in zuidelijke richting volgt. De andere tak die via het Kanaal de Noordzee binnenkomt heeft aanzienlijk minder effect op het getij voor de Nederlandse kust. In de Noordzee is de aantrekkingskracht tussen aarde en maan de dominante factor in het getij, het zogenaamde M2 getij.

Omdat er twee hoog- en twee laagwaters zijn, spreken we van een dubbeldaags getij.

Vanuit de Noordzee dringt de getijgolf de Westerschelde binnen. Juist bij Vlissingen is het getijverschil sterk ten opzichte van andere lokaties langs de Nederlandse kust. Vanaf Vlissingen neemt het getijverschil in de Westerschelde toe. Bij een gemiddeld getij bedraagt het verschil tussen hoog- en laagwater in Vlissingen ongeveer 4 meter. Bij Antwerpen is dit verschil opgelopen tot 5.5 meter als gevolg van de geometrie van het estuarium. Stroomopwaarts van Antwerpen neemt het getijverschil langzaam af doordat de getij energie door wrijving aan de bodem gedissipeerd wordt. Naast het dubbeldaags getij zorgt de springtij - doodtij cyclus voor water-

.....
² Een deel van het water uit het stroomgebied van de Schelde wordt via kanalen recht-streeks naar de Westerschelde of naar zee afgevoerd. Een voorbeeld is het water van de rivier de Leie, dat via het afleidingskanaal van de Leie direct naar zee wordt afgevoerd en via het Kanaal Gent-Terneuzen rechtstreeks op de Westerschelde wordt geloosd.

standsverschillen. Als gevolg hiervan varieert het getijverschil bij Vlissingen gedurende deze cyclus tussen de 3 en de 4.5 meter. De getijgolf verplaatst een grote hoeveelheid water. De hoeveelheid zee-water die tijdens de vloedperiode de Westerschelde binnenstroomt (ook wel *getijprisma* genoemd) bedraagt bij Vlissingen ca. 1.3 miljard kubieke meter. Aanvankelijk door de geulen en later ook over de ondiepere gedeelten van het estuarium stroomt het water richting Antwerpen. Doordat de komberging van de Westerschelde benut wordt en omdat de getijgolf door bodemwrijving afgeremd wordt, is dit vloedvolume bij Antwerpen afgenomen tot ca. 80 miljoen kubieke meter. Tijdens de eb fase van het getij wordt een gelijke hoeveelheid water (aangevuld met wat rivierwater) weer naar zee afgevoerd. Het getijprisma is van belang met het oog op het sediment transport vanaf zee dat erdoor wordt aangedreven. Later zullen we zien dat een klein verschil in sedimentconcentratie tussen het in- en uitstromende water kan leiden tot een (relatief) groot sediment transport.

Een drijvend mechanisme verantwoordelijk voor een netto transport in estuaria, is de asymmetrie van het getij [Dronkers, 1986; Van de Kreeke, 1993]. Het is gemakkelijk in te zien dat de totale hoeveelheid water die bij vloed de Westerschelde binnen stroomt en bij eb naar buiten stroomt gelijk moet zijn. De verdeling van dit transport binnen het getij is, is echter niet nader bepaald. Het M2 getij zelf geeft op de Atlantische oceaan een symmetrisch verloop van de waterstand. De periode tussen hoogwater en laagwater is even lang als van laagwater tot het volgende hoogwater. Wanneer de getijgolf in ondiepere delen van de Noordzee aanbeldt, ontstaan door verschillen in bodemwrijving tussen eb en vloed vervormingen in het M2 getij. In diepe gebieden plant de getijgolf zich sneller voort dan in ondiepe gedeeltes. Hierdoor duurt de vloedperiode bij Vlissingen ongeveer een half uur korter dan de ebperiode. Ter hoogte van Antwerpen is dit verschil opgelopen tot grofweg een uur. De kortere duur van het transport tijdens de vloedfase van het getij wordt gecompenseerd door hogere stroomsnelheden. Menselijke ingrepen in het estuarium hebben dit effect nog enigszins versterkt. In paragraaf 2.3 staan we stil bij de consequenties van deze asymmetrie voor het transport van sediment.

Het waterstandsverschil veroorzaakt door de getijgolf wordt ook wel het vertikaal getij genoemd. Deze aanduiding wordt geïntroduceerd om het onderscheidt met het horizontaal getij te kunnen maken, i.e. de *stroming* die het gevolg is van het passeren van de getijgolf. De stroomsnelheden in de Westerschelde variëren sterk van plaats tot plaats. Over het algemeen is de stroomsnelheid het hoogst in de geulen. Onder gemiddelde getij omstandigheden bedraagt de maximale stroomsnelheid aan het wateroppervlak rond de 1.5 m/s. Piekwaarden van 2.5 m/s zijn echter geen uitzondering (o.a. springtij). Aan de bodem zijn de stroomsnelheden lager en geldt gemiddeld een maximale waarde rond de 0.75 m/s. Afhankelijk van de lokatie zijn aan de bodem waarden tot 1.0 - 1.5 m/s mogelijk.

2.2.2. De aanvoer van zoetwater

Het getij zorgt aldus voor de aanvoer van zeewater naar de Westerschelde. Aan de andere uiteinde van het estuarium zorgt de rivier de Schelde voor de aanvoer van zoetwater. De Schelde is een laagland regenrivier, waarvan de afvoer, afhankelijk van de klimatologische omstandigheden, sterk wisselt. De afvoer van Schelde water bij Rupelmonde varieert tussen de 20 en 600 m³/s. Over het algemeen is de afvoer in het winterseizoen hoger dan tijdens de zomer.

In de Beneden Zeeschelde komen het zeewater en het rivierwater bij elkaar.

De grootte van de mengzone van zoet- en zoutwater is afhankelijk van de rivierafvoer. Bij hoge rivierafvoer komt het zeewater niet voorbij Antwerpen, terwijl bij lage rivierafvoer de mengzone zich uitstrekt tot Rupelmonde. Volgens de theorie [Van Leussen, 1991] veroorzaken dichtheidsverschillen in saliniteit een stroming die aan de bodem in de Westerschelde stroomopwaarts gericht is. Aan de riviervoorzijde van de brakwaterzone komen de sedimentstromen vanuit zee en vanaf de rivier samen waardoor er een lokale verhoging van de troebelheid ontstaat. Meer hierover in paragraaf 2.3.

Over het algemeen is het Schelde estuarium goed gemengd, in de zin dat gelaagdheid van de waterkolom nauwelijks optreedt. Alleen bij stroomkentering na hoogwater kan er in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens kortstondig stratificatie optreden als gevolg van "tidal adjustment". Het vloedgetal N_v is een maat voor de menging in een getijrivier. Voor de Westerschelde geldt in de omgeving van de grens:

$$N_v = \frac{Q_{riv} \times T_{getij}}{V_{vloed}} = \frac{100 \times 45000}{10^8} = 0.045$$

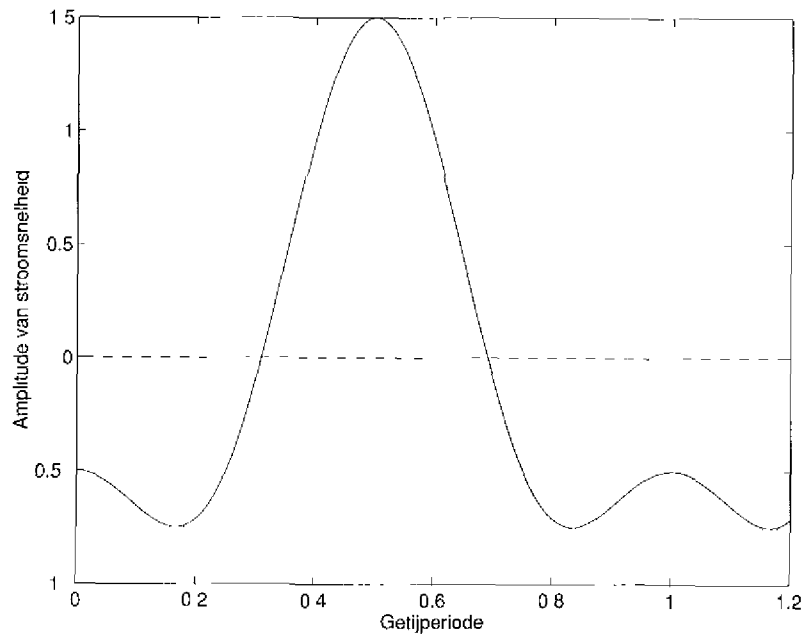
In deze formule staat Q_{riv} voor het debiet van de Schelde, T_{getij} voor de lengte van een getijperiode in seconden en V_{vloed} voor de hoeveelheid water die bij vloed vanaf zee de Westerschelde binnenstroomt. Voor $N_v < 0.1$ wordt het estuarium als goed gemengd beschouwd. Tijdens doodtij of bij een hoge rivier afvoer kan een gedeeltelijk gemengde situatie ontstaan, waardoor de zoutindringing kan worden versterkt.

Op kleinere schaal spelen dichtheidsverschillen - zowel in horizontale als in verticale richting - een rol van betekenis. Aan het einde van de vloedperiode is het water in de rivier de Schelde aanmerkelijk zouter dan het water in de toegangsgeulen naar de zeesluizen. Het dichtheidsverschil dat hiervan het gevolg is, zorgt voor een stroming die aan de bodem de toegangsgeul in gericht is. Deze stroming is de aandrijvende kracht achter het transport van slib vanuit de toegangsgeulen via de zeesluizen naar de havendokken. Het slib dat (in zeer hoge concentratie) in de toegangsgeul aanwezig is, wordt door de stroming die het gevolg is van dit verschil in saliniteit richting de sluisen getransporteerd. Meer hierover in paragraaf 3.1.

2.3 Aanvoer van slib naar de Westerschelde

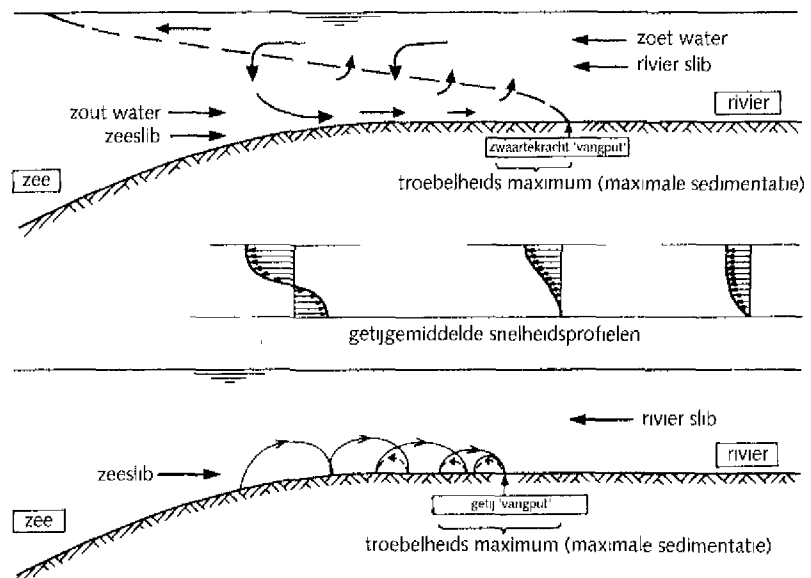
In paragraaf 2.2.1 hebben we gezien hoe de getijbeweging sedimenttransport kan veroorzaken. We zullen een aantal transportprocessen nader beschouwen. Ter sprake gekomen is de getijasymmetrie, welke resulteert in een relatief korte vloedperiode met hoge stroomsnelheden en een langere ebperiode met lagere stroomsnelheden. De heel fijne slibfractie ($< 2 \mu m$) zal voor een groot deel permanent in suspensie blijven en met het water heen en weer verplaatst worden door het getij. De grovere slibdeeltjes hebben een bepaalde stroomsnelheid nodig om in suspensie te blijven. Turbulentie als gevolg van de stroming dient als compensatie voor de valsnelheid van de deeltjes en zorgt ervoor dat het slib in suspensie blijft. Wanneer de turbulente krachten te klein zijn zal het slib bezinken. Er is dus een bepaalde kritische stroomsnelheid nodig om het slib in suspensie te houden. Een extreme situatie wordt getoond in onderstaande figuur.

Figuur 2.2 Gevolgen van asymmetrie in het getij voor het transport. De kritische snelheid waarboven slib in suspensie kan raken wordt aangegeven door de horizontale stippellijnen



De stroomsnelheid die tijdens de ebfase van het getij bereikt wordt is niet voldoende het slib dat in de vloedperiode is afgezet te eroderen. Tijdens de vloed fase is de stroomsnelheid tijdelijk wel hoog genoeg om erosie te mogelijk te maken. In deze situatie zal er slib het estuarium in getransporteerd worden ondanks het feit dat het netto (rivier)water transport naar zee gericht is. Het transportmechanisme wordt ook wel "Postma transport" genoemd en wordt nog eens geïllustreerd in het onderste paneel van figuur 2.3 afkomstig uit [Van Leussen, 1991]

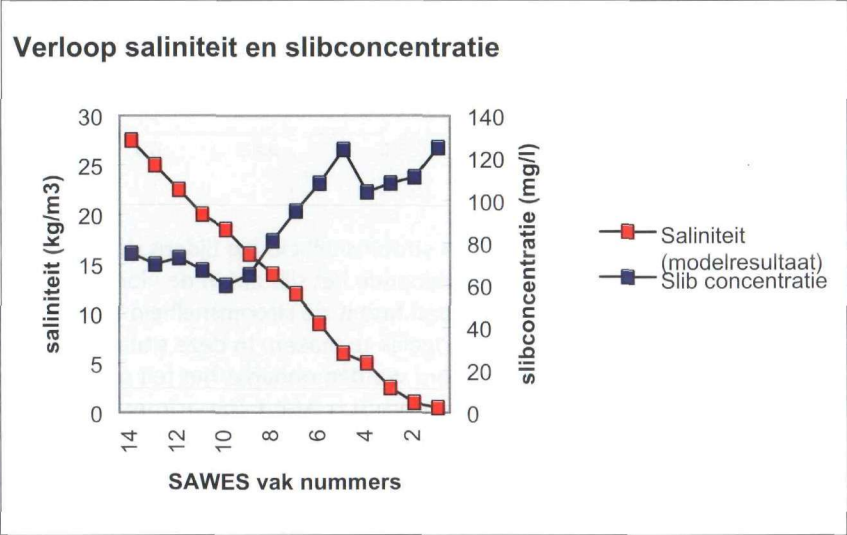
Figuur 2.3.: Transport van slib als gevolg van dichtheidsverschillen en getij asymmetrie. Naar [Van Leussen, 1991]



In het bovenste paneel van deze figuur wordt het mechanisme geïllustreerd dat verantwoordelijk is voor de aanvoer van sediment vanaf de rivier de Schelde. Het waterniveau aan de rivierzijde van het estuarium is hoger dan het zeewaterniveau. Afhankelijk van het niveauverschil wordt een zekere hoeveelheid zoetwater met een bepaalde slibconcentratie naar de Beneden Zeeschelde aangevoerd. Dichtheidsverschillen door saliniteit leiden tot een

convergentie van de slibstromen vanuit zee en vanaf de rivier aan de rivierzijde van de brakwaterzone. De goede menging van rivierwater en zeewater leidt ertoe dat het fluviatiele en het mariene slib in het overgangsgebied eveneens goed gemengd zijn. De fysisch-chemische eigenschappen van het rivierslib geven aanleiding tot vlokvorming wanneer de saliniteit toeneemt. Daarnaast kan organisch materiaal als plakstof fungeren waardoor vlokvorming andermaal bevorderd wordt. Vlokvorming leidt tot een toename van de valsnelheid van het slib waardoor het slib zal uitzakken naar de bodem. Dit draagt bij tot de vorming van een troebelingsmaximum iets stroomopwaarts van deze zône (zie figuur 2.3). De lokatie van deze relatief troebele zône is, afhankelijk van de rivierafvoer, gelegen tussen de Belgisch-Nederlandse grens en Antwerpen. Een groot deel van het aangevoerde slib sedimenteert stroomopwaarts van deze zône.

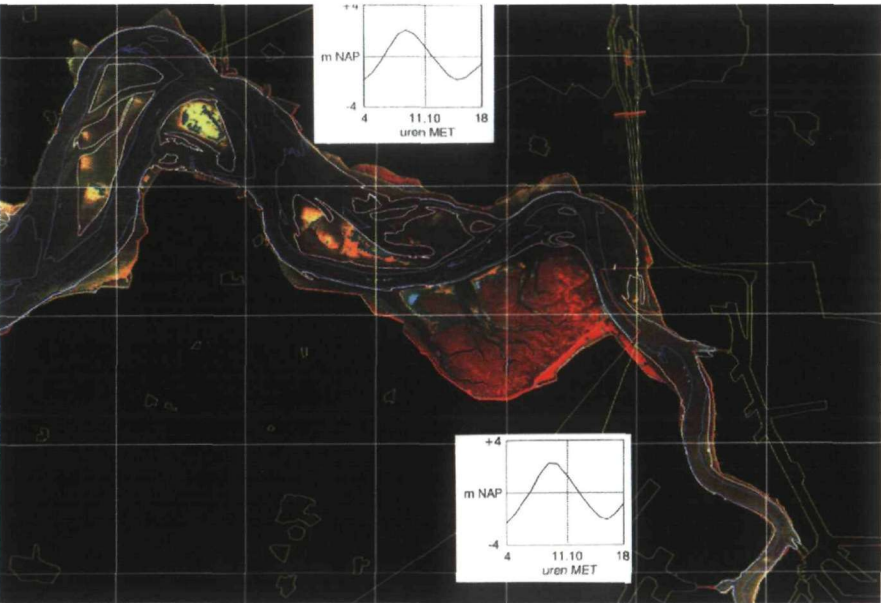
Figuur 2.4: Verloop saliniteit en gemiddelde slib concentratie over het estuarium



2.4 Karakterisering van het slib in de Westerschelde

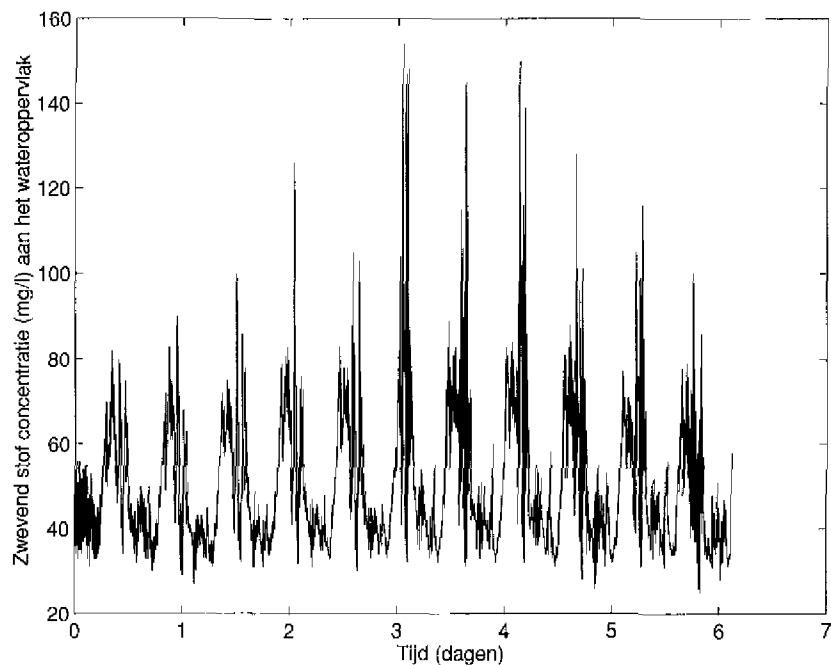
Het slib dat met het water wordt meegevoerd naar de Westerschelde zoekt zich een weg in het estuarium. De slibconcentratie in het estuarium bedraagt - afhankelijk van de getijfase, fase in de springtij/doodtij cyclus en seizoen - 50 à 200 mg/l. Ook de ruimtelijke variaties zijn groot.

Figuur 2.5: Ruimtelijke variaties in slibconcentratie. Landsat opname juni 1986. Uit Landsat atlas RIKZ/OS-95.802X.



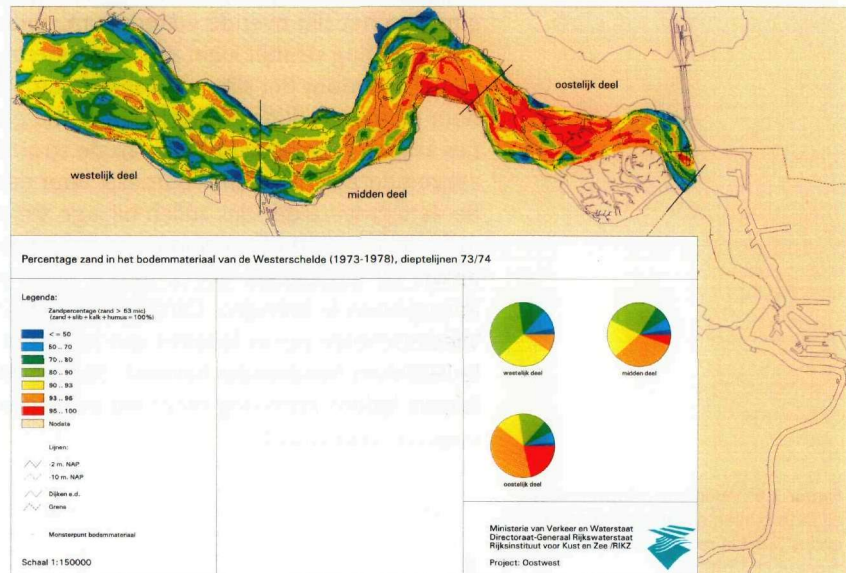
De turbulentie zorgt bij een voldoende getijstrooming voor een sterke menging van het slib over de waterkolom, zodat concentratie verschillen in verticale richting relatief klein zijn. Bij kentering krijgt de valsnelheid de overhand, waardoor het slib "uit kan zakken". De fijnere slibdeeltjes zullen door de getijwerking echter in suspensie gehouden worden. Deze slibdeeltjes krijgen zelfs bij kentering van de stroming geen kans naar de bodem te zakken en zijn zo verantwoordelijk voor een soort achtergrond concentratie. Iets grovere deeltjes zullen bij lage stroomsnelheden tijdelijk bezinken maar bij het aantrekken van de stroming weer opgewerveld worden. Hoe grover de slibdeeltjes, des te sterker de stroming moet zijn om deze deeltjes in suspensie te brengen. Omdat de getijstrooming varieert in sterkte in de Westerschelde zijn er lokaties aan te wijzen waar het slib de voorkeur heeft te bezinken (waaronder havens). Sedimentatie treedt op wanneer er op een lokatie tijdens kentering meer slib bezinkt dan er bij sterke stroming weer opgewerveld wordt.

Figuur 2.6. Variatie in slibconcentratie bij Bath binnen de springtij-doodtij cyclus (Zeekat metingen 22-28 november 1988)



Echter niet alleen het dubbeldaags getij is verantwoordelijk voor variatie in de stroomsnelheden. Ook de springtij-doodtij cyclus en stormen dragen hiertoe bij. Golfwerking tijdens stormomstandigheden zorgt voor verwerking van de bodem in ondiepe gebieden waardoor het sediment door de getijstrooming in suspensie gebracht en getransporteerd kan worden. De combinatie van windopzet en golven maakt het mogelijk dat ook de hoger gelegen schorren overspoeld worden en er sedimentafzetting kan plaatsvinden. De sedimentatie die onder normale getijcondities heeft plaatsgevonden, is daarom vaak tijdelijk van aard. Een voorbeeld hiervan is sedimentatie op platen in het zomerseizoen welke in het winterseizoen weer teniet wordt gedaan. Toch zijn er gebieden die preferentieel sedimenteren. Hiertoe behoren de slikken en schorren in de Westerschelde. De lokaties van deze gebieden zijn aangegeven in figuur 2.7.

.....
 Figuur 2.7: Sedimentatie gebieden voor slib. In de blauw gekleurde gebieden heeft het sediment een hoog slibgehalte.



Het Land van Saeftinge is een groot schor complex. Door sedimentatie komt het steeds hoger boven de waterspiegel te liggen. Hierdoor overstroomd het gebied minder vaak (inundatie frequentie). Dit heeft consequenties voor het ecologisch functioneren van het systeem (zie ook paragraaf 2.6). Een laagje slib op de bodem zal naar verloop van tijd inklinken waardoor een zekere sterkte wordt opgebouwd. Dit proces wordt ook wel consolidatie genoemd.

Door wijzigingen in de stromingspatronen, inpoldering en in de aanvoer van sediment, kan de ontwikkeling van schorren en slikken beïnvloed worden.³ In [Vroon et al., 1997] wordt aangegeven dat het schorareaal de afgelopen decennia sterk afgenomen is.

Sedimentatie op slikken en schorren zorgt aldus voor berging van een deel van het aangevoerde slib. Ook de bodem van de Westerschelde speelt hier een rol in. De bodem bestaat voornamelijk uit zand. Het slibpercentage is laag en bedraagt gemiddeld maximaal enkele procenten. Ruimtelijke variaties kunnen echter groot zijn. De hoeveelheid slib die in de loop der jaren (decades) in de bodem is geaccumuleerd is echter erg groot. In [Van Maldegem, 1993a] wordt de slibvoorraad in de bovenste meter van de bodem op 40 miljoen ton geschat. Verantwoordelijk voor deze accumulatie is het dynamisch gedrag van de bodem in de Westerschelde. Deze dynamiek bestaat uit de migratie van geulen, zandgolven en ribbels. De tijdschaal waarop migratie plaatsvindt varieert sterk. Geulen migreren in decennia, zandgolven op een tijdschaal van een jaar en ribbels binnen het getij. De dynamische bodemlaag is ca. 0.5 m dik en wordt naar schatting een à twee maal per jaar omgewoeld [Van Maldegem et al., 1993b]. De omwoeling van de bodem als gevolg van deze migratie zorgt ervoor dat slib vrij kan komen maar ook ingevangen kan worden. Gezien de voorraad slib die momenteel aanwezig is in de bodem, kan een kleine wijziging in het slibpercentage in het bodemmateriaal grote gevolgen hebben voor de beschikbaarheid van slib in de Westerschelde. De baggeractiviteiten die op de drempels in de Westerschelde plaatsvinden ten behoeve van de scheepvaart zorgen voor een extra stukje "dynamiek". De continu verplaatsing

.....
³ De schorvorming bij het land van Saeftinge is in het verleden uit oogpunt van landwinning kunstmatig gestimuleerd.

van zand vanaf de drempels naar de scharen houdt het sediment in beweging. Door overvloedverliezen tijdens het baggeren kan een deel van het slib uitgespoeld worden en in suspensie op transport gaan. Zo wordt de bodemvoorraad gemobiliseerd en kan deze leiden tot een verhoging van de troebelheid. Mogelijk dat een deel van dit slib in de Beneden Zeeschelde terecht komt (zie paragraaf 5.8). Het is niet ondenkbaar dat ook de verdieping van de vaargeul in de Westerschelde die recent gerealiseerd is, de dynamiek van de bodem kan beïnvloeden.

Wat geldt voor de bodem van de Westerschelde geldt (in iets mindere mate) ook voor de Beneden Zeeschelde. Aan de hand van monsternamen en sonderingen is door Bastin in '64, '86 en '92 de slibinhoud van de bovenste meter van de bodem in de Beneden Zeeschelde bepaald. Dit onderzoek is gerapporteerd in [Bastin, 1993]. Door de resultaten van de verschillende opnames te vergelijken kan de evolutie van de slibvoorraad in de tijd bepaald worden. Aangenomen wordt dat de bovenste meter van de bodem de actieve laag is van waaruit sedimentuitwisseling met het water plaatsvindt. In hoofdstuk 4 zullen we zien dat de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde een cruciale rol speelt in het bepalen van de effecten van de slibverwijdering ter plaatse.

2.5 De relatie tussen slib en water- en bodemkwaliteit in de Westerschelde

In de jaren zestig en zeventig is als gevolg van een toenemende economische ontwikkeling en bevolkingsgroei de industriële activiteit in het Schelde stroomgebied sterk toegenomen. De hiermee gepaard gaande uitstoot van afvalstoffen heeft sterk negatieve gevolgen gehad voor de water- en bodemkwaliteit van het systeem. Het groeiende milieubesef in het begin van de jaren tachtig, in combinatie met (inter)nationale regelgeving heeft langzaam geleid tot een daling van de emissies. Toch is de kwaliteit van het watersysteem momenteel verre van goed te noemen. Stoffen die tijdens de industriële bloeiperiode van dertig jaar geleden zijn uitgestoten, liggen vaak nu nog opgeslagen in de waterbodem. Saneringsmaatregelen, gepaard gaande met verdere afname van de emissies, kunnen op termijn echter nog een forse verbetering van de waterkwaliteit bewerkstelligen.

Slib is een drager van contaminanten als spoormetalen en organische microverontreinigingen. De contaminanten hechten zich gedeeltelijk aan het organisch materiaal dat in het slib aanwezig is. Een ander deel is opgelost in water. De binding van de chemische stoffen is geen statische toestand. Als gevolg van wisselende externe omstandigheden in zout- en zuurstofgehalte, kan de verdeling van de contaminanten over de waterfase en het slib veranderen. Dit heeft gevolgen voor het transport van deze stoffen, omdat het transport van slib volgens een essentieel ander mechanisme verloopt dan het transport van water.

In de omgeving van het troebelingsmaximum treedt een sterke variatie van de opgeloste spoormetaalconcentraties op gedurende het seizoen, als gevolg van variërende zuurstof beschikbaarheid [Zwolsman & Van Eck, 1993]. In het voorjaar en in de zomer zijn de spoormetaalconcentraties laag als gevolg van de zuurstofloze omstandigheden. Er vindt reductie van ijzersulfaat plaats waarbij sulfide gevormd wordt. Tevens worden er ijzer- en mangaanhydroxides gevormd. De opgeloste spoormetalen binden zich aan deze metaalcomplexen en aan zwevend stof, waardoor de concentraties afnemen. Bij een toename van de saliniteit en zuurstofgehalte nemen de spoormetaalconcentraties weer snel toe. Door desorptie vanuit zwevend stof, worden in de Westerschelde in de winter over het algemeen hogere concentraties spoormetalen gevonden.

De toename van het zuurstofgehalte in het watersysteem brengt het gevaar met zich mee dat nu nog gebonden zware metalen als Cadmium, Kwik en Koper in oplossing raken ("Chemical Time Bomb"). Het is onduidelijk hoe groot dit gevaar is, zowel qua grootte als qua snelheid waarmee het op kan treden. Zeker is wel dat de in de bodem opgeslagen vervuiling ons nog jarenlang voor problemen zal stellen

Als gevolg van mengprocessen in het estuarium neemt het percentage fluviatiel materiaal in het slib af van 100% in de omgeving van Rupelmonde, tot ca. 10% bij de monding van de Westerschelde. Het percentage fluviatiel slib blijkt in sterke mate bepalend te zijn voor de gehalten aan spoormetalen in het sediment. Er bestaat voor veel spoormetalen een praktisch lineair verband tussen het gehalte en de grootte van de fluviatiele fractie in het slib [Zwolsman et al., 1996]. Dit maakt het percentage fluviatiel materiaal in het sediment een uitstekende indicator voor de kwaliteit van het sediment.

De ingebruikname van rioolwaterzuiveringsinstallaties op Vlaams grondgebied leidt tot een verminderde uitstoot van afvalstoffen op de Schelde. Hierdoor neemt onder andere het zuurstofgehalte in de Schelde toe waardoor het watersysteem voor meer diersoorten leefbaar wordt. Nu al worden er meer vogels gesignaleerd in de Beneden Zeeschelde en keren trekvisser langzaam terug. Al hoewel er verbetering optreedt, is de toestand op de Schelde zelf en haar zijrivieren nog zorgwekkend [De Water, 1997]. Het zwevend stof voldoet voor zowel zware metalen als voor organisch microverontreinigingen nog lang niet aan de (Nederlandse) norm

Voor een besluit over het al dan niet continueren van de slibverwijdering is ook de kwaliteit van het sediment dat nu wordt aangevoerd bij Rupelmonde van belang. Dit slib vertegenwoordigt immers het sediment dat in de toekomst de waterbodem van de Beneden Zeeschelde zal vormen en dus in de toekomst de kwaliteit ervan zal bepalen. Hoe de kwaliteitsontwikkeling in de tijd zal verlopen, is niet geheel duidelijk omdat dit afhangt van enerzijds de toekomstige toevoer van fluviatiel slib naar de Beneden Zeeschelde en anderzijds van de mate van uitwisseling van dit nieuw aangevoerde fluviatiele slib met de huidige slibvoorraad in de Beneden Zeeschelde. Tenslotte spelen daarbij ook nog een rol diverse processen in water en bodem (o.a. oxidatie metaalsulfiden en de afbraak van organische microverontreinigingen), de emissies in het Antwerpse havengebied zelf en de aanvoer van marien slib uit de Westerschelde dat een kwaliteitsverbetering bewerkstelligt van het slib in de Beneden Zeeschelde. Het slib dat bij Rupelmonde vanuit het stroomgebied wordt aangevoerd is getoetst. Voor de toetsing zijn de gegevens van Rupelmonde gebruikt die tijdens de 10 tochten van "Herhaling SAWES" in de periode '95-'96 bepaald zijn. Het betreft alleen gegevens voor stoffen die sterk aan slib zijn gebonden, in concreto de spoormetalen, PCB's, PAK's, EOX en minerale olie. De waterkwaliteit is niet getoetst. Ook de gegevens voor de sedimentsamenstellingscorrectie zijn uit de data-base herhaling SAWES afkomstig. Per stof is hieruit een range (maximum-minimum) van mogelijke gehalten in het slib bij Rupelmonde afgeleid. Vervolgens is deze range met behulp van het zogenaamde Waterbodem Beoordeling Ondersteunend Systeem (WABOOS) getoetst aan de normen uit de Evaluatie Nota Water (ENW, met nieuwe PAK normen) en de normen van de Uniforme Gehaltetoets, het beoordelingssysteem voor de verspreiding van baggerspecie in zoute wateren. Dit zijn de huidige gangbare normen in Nederland. Vermoedelijk zullen er eind 1998 nieuwe normen zijn en wel die uit de Vierde Nota Waterhuishouding. Hieraan is nog niet getoetst. Tenslotte is voor de stoffen die niet voldoen aan de Uniforme Gehaltetoets onderzocht bij welke gehalten dit wel het

geval is. Dit geeft ruwweg de emissiereductie die nog gerealiseerd moet worden. De resultaten staan in tabel 2.1.

Tabel 2.1: Toetsing van spoormetalen en organische microverontreinigingen aan de Nederlandse norm voor zoute baggerspecie.

Stof	Nominale range getoetst	Range getoetst na sediment correctie	ENW toetsing: klasse met () % normoverschreiding	Uniforme gehalte toets: met () % norm-overschreiding	Emissie reductie nodig om aan Uniforme Gehalte toets te voldoen
org. stof (%)	12,5-15				
% < 2um (%)	25-30				
Cadmium (mg/kg)	7,5-10	6,4 - 9,4	2 (218) - 3 (25)	1 (59) - 1 (134)	40%
Kwik (mg/kg)	1-1,5	0,9 - 1,5	2 (84) - 2 (196)	0 - 1 (23)	
Koper (mg/kg)	105-150	90 - 144	2 (157) - 3 (60)	1 (50) - 1 (140)	30%
Nikkel (mg/kg)	50	44 - 50	2 (25) - 3 (11)	0 - 1 (11)	
Lood (mg/kg)	175-200	157 - 194	1 (84) - 1 (129)	1 (42) - 1 (77)	30%
Zink (mg/kg)	700-750	603 - 730	2 (26) - 4 (1)	1 (65) - 1 (100)	40%
Chroom (mg/kg)	160-200	146 - 200	1 (45) - 1 (100)	1 (21) - 1 (67)	20%
Arseen (mg/kg)	40-50	35 - 48	1 (21) - 1 (67)	1 (21) - 1 (67)	25%
EOX (mg/kg)	5	3,3 - 4	2 - 2		
min. olie (mg/kg)	2000	1333 -1600	2 (33) - 2 (60)	1 (7) - 1 (28)	15%
PCB- 28 (ug/kg)	9-10	6 - 8	2 (50) - 2 (100)	0 - 0	
- 52 (ug/kg)	15	10 - 12	2 (150) - 2 (200)	0 - 0	
- 101 (ug/kg)	40-50	27 - 40	2 (567) - 3 (33)	0 - 1 (33)	
- 118 (ug/kg)	20	13 - 16	2 (233) - 2 (300)	0 - 0	
- 138 (ug/kg)	40-75	27 - 60	2 (567) - 3 (100)	0 - 1 (100)	
- 153 (ug/kg)	45-75	30 - 60	2 (650) - 3 (100)	0 - 1 (100)	
- 180 (ug/kg)	40-50	27 - 40	2 (567) - 3 (33)	0 - 1 (33)	
som 6 PCB's	189-275	126 - 220	1 (530) - 1(1000)		
som 7 PCB's	209-295	139 - 236	0 - 3 (18)		
alle PAK's in mg/kg					
som 10 PAK's	8,25-9,55	5,5 - 7,6	2 (450) - 2 (664)		
Naftaleen	0,6-0,75	0,4 - 0,6		0 - 0	
Fenantreen	0,8-1	0,53 - 0,8		0 - 0	
Anthraceen	0,25-0,3	0,17 - 0,24		0 - 0	
Fluorantheen	2,5-3	1,7 - 2,4		0 - 1 (20)	
Chryseen	0,8-1	0,53 - 0,8		0 - 0	
Benzo(a)antraceen	1	0,67 - 0,8		0 - 0	
Benzo(a)pyreen	0,8-1	0,53 - 0,8		0 - 0	
Benzo(k)fluorantheen	0,5	0,33 - 0,4		0 - 0	
Indenopyreen	0,5	0,33 - 0,4		0 - 0	
Benzo(ghi)peryleen	0,5	0,33 - 0,4		0 - 0	

De tabel geeft het volgende beeld. De range bij Rupelmonde is niet het zelfde voor alle stoffen. Van de metalen hebben Cu, Hg, Cd, Cr en As de grootste range net als enkele PCB's (138, 153) maar de overige PCB's en PAK's zijn vrijwel constant. Binnen de waargenomen ranges in de periode '95-'96, is bij toetsing aan de ENW normen klasse 2 als eindoordeel mogelijk hoewel de klasse 2 normoverschrijdingen voor sommige stoffen dan vrij groot zijn. De Uniforme Gehalte Toets voor verspreiding in zout water geeft aan dat verspreiding binnen de opgetreden ranges niet mogelijk is. De stoffen die hiervoor verantwoordelijk zijn, zijn de metalen en minerale olie. De emissiereductie percentages die voor de diverse spoormetalen nodig zijn om tot een eindoordeel klasse 0 te komen, zijn redelijk groot maar zeker niet onhaalbaar binnen een aantal jaren. Dit oordeel is o.a. gebaseerd op de Nederlandse situatie die de afgelopen jaren heeft laten zien dat met betrekking tot de spoormetalen hoge emissiereducties in relatief korte tijd zeer wel haalbaar zijn. De conclusie van het geheel voor het

nieuw te vormen sediment in de Beneden Zeeschelde is dat een eindoordeel voor de ENW toetsing van klasse 2 en voor de Uniforme Gehaltetoets van klasse 0 binnen een aantal jaren een realistische veronderstelling is.

2.6 De betekenis van slib voor de ecologie van de Westerschelde

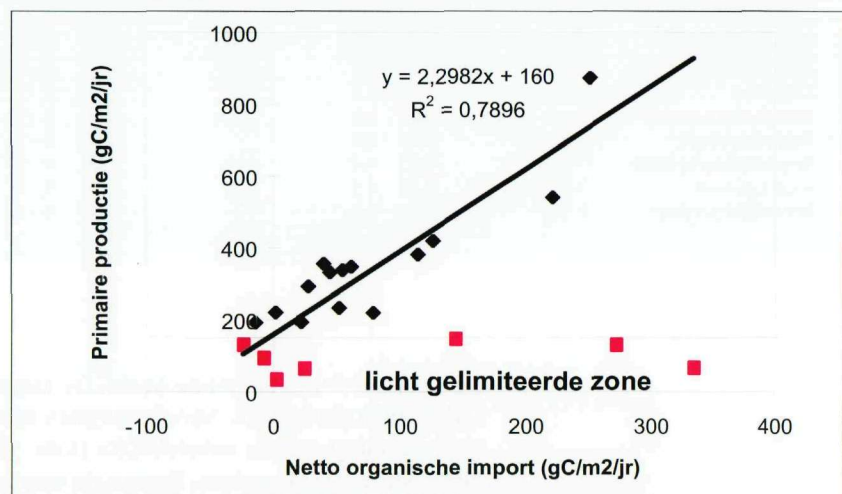
In het algemeen wordt aangenomen dat er een relatie is tussen de aanwezigheid van slib in het watersysteem en het ecologisch functioneren van dit systeem. In de praktijk blijkt het echter erg moeilijk dit verband te kwantificeren. We beperken ons daarom in deze paragraaf tot het opsommen van een aantal abiotische factoren van invloed op het functioneren van het ecosysteem.

Troebelheid

Licht is in de meeste Nederlandse kustwateren de limiterende factor wanneer het de primaire produktie betreft. Dit is met name het geval in de Westerschelde. Variaties in slibconcentratie kunnen het lichtklimaat en daarmee de produktiviteit van het ecosysteem beïnvloeden. Een verlaging van de slibconcentratie kan leiden tot een overmatige algenbloei, welke afhankelijk van de soortendiversiteit als ongunstig bestempeld wordt. Een toename van de troebelheid leidt in het algemeen tot een afname van de primaire produktie. Vanwege de relatief hoge troebelheid die van nature aanwezig is in de Westerschelde, hebben algen zich aan de omstandigheden aangepast. Vanwege dit aanpassingsvermogen zal een kleine toename van de troebelheid geen grote veranderingen in primaire produktie tot gevolg hebben [The Wetlands, 1997].

In [Heip et al., 1995] wordt het verband gegeven tussen de primaire produktie en de aanvoer van organisch materiaal voor een groot aantal estuaria verspreid over de wereld. Figuur 2.8 is afkomstig uit dit artikel.

Figuur 2.8.: Het verband tussen de primaire produktie en de import van organisch materiaal in een groot aantal estuaria verspreid over de wereld. De estuaria die licht gelimiteerd zijn, worden met ■ aangegeven, de anderen met ♦ Naar [Heip et al., 1995]



Boven een bepaalde minimum waarde van de primaire produktie bestaat er een (lineair) verband tussen de aanvoer van organisch stof en de produktie. Deze minimum waarde geeft de grens aan waaronder de produktie licht gelimiteerd is. Aanvoer van meer organisch materiaal leidt dan niet tot een hogere primaire produktie. De Westerschelde bevindt zich in deze zone. Naast licht speelt het zoutgehalte een belangrijke rol bij de primaire produktie. In de overgangszone van zoet naar zoutwater die gepaard gaat met een verschuiving van zoetwater fytoplankton naar zoutwater fytoplankton, is een minimum in produktie aanwezig. Deze overgangszone bevindt zich in de omgeving van Bath.

Oogjagers, waaronder vissen (haring, makreel en tarbot) en vogels (sterns, aalscholvers, duikers en zee-eenden), zijn afhankelijk van de hoeveelheid licht en de helderheid van het water om prooidieren te lokaliseren en te herkennen. Verandering van de troebelheid beïnvloedt zowel de mogelijkheden voor een predator om een prooi te vangen als de ontsnappingsmogelijkheden van de prooi zelf. Een verhoging van de troebelheid in het water leidt tot een afname in fourageergebied van oogjagende vissen en vogels waardoor hun populaties negatief beïnvloed zullen worden. Van haring en sprat zijn waarnemingen bekend dat ze troebel water vermijden. Dit kan grote gevolgen hebben wanneer de troebelheid in het paaigebied wordt verhoogd [Van Dalfsen, 1998].

Het slibgehalte in het sediment

Het effect van een verandering van het slibgehalte in het bodemsediment is afhankelijk van het organisme dat beschouwd wordt. Organismen die zich thuis voelen in slibrijk sediment zullen anders reageren dan zandliefhebbers. Het blijkt echter dat dezelfde soorten in de Oosterschelde bij een veel lager slibgehalte (0-10%) in de bodem voorkomen dan in de Westerschelde (10-50%). De indeling zeer weinig slib (hoog dynamisch), laag tot matig slibgehalte en slibrijk, sluit beter aan op de soortensamenstelling dan absolute percentages, waarbij veel slib in de Oosterschelde ca. 10% slib is en in de Westerschelde meer dan 50% slib. Een afname van het slibgehalte hoeft daarom niet persé gevolgen te hebben voor de soortenrijkdom en de biomassa. Daarentegen vergroot een toename van het slibgehalte in het sediment de kans dat het bodemsediment bedekt wordt en afgesloten wordt van de erboven gelegen waterkolom. Een afname van het zuurstofgehalte in het sediment kan voor sommige organismen fataal zijn. Ook filterfeeders als mosselen en kokkels kunnen, afhankelijk van het organisch stof gehalte in het slib, negatieve gevolgen ondervinden van een verhoogd slibgehalte. Een toename van het slibgehalte in het sediment lijkt ernstigere gevolgen te hebben dan een afname omdat de gevolgen van het eerste soort op korte termijn effect zullen sorteren [The Wetlands, 1997].

Aanslibbing van schorren

Als laatste staan we nog even stil bij de rol die de slibconcentratie speelt bij de aangroei van schorren. Op de schorren zijn de omstandigheden voor sedimentatie gunstig doordat vegetatie leidt tot lage stroomsnelheden. In de beschutting van deze planten vindt erosie nauwelijks plaats. Wanneer de slibconcentratie toeneemt, zal dit leiden tot een versnelde aanslibbing van schorren omdat er bij overstroming van het schor meer slib zal achterblijven. Deze versnelde aanslibbing zal vanzelf afgeremd worden, omdat de verhoogde ligging van het schor automatisch leidt tot een afname van de inundatie frequentie. Een afname van de slibconcentratie zal in eerste instantie de schorgroei afremmen. Het schor kan echter gedurende een langere periode overstromd blijven worden.

Momenteel is het zo dat door het vele baggerwerk dat voor het vaargeulonderhoud uitgevoerd wordt, het ontstaan van jong schor tegengegaan wordt. De combinatie van diepere geulen en hogere platen laat minder ruimte over voor ondiepwaterareaal. Verdieping en inpoldering heeft de dynamiek van de Westerschelde verkleind en de stroomlijning van het estuarium en gaat het ontstaan van nieuwe schorren tegen [Vroon et al., 1997].

De overgang tussen geul en intergetijde gebied wordt door verdiepingswerkzaamheden in de geul steeds steiler. Dit kan een oorzaak zijn van het afkalven van de schorranden dat de laatste jaren plaatsvindt bij veel schorren in het oostelijk deel van de Westerschelde. Het zal moeten blijken of de effecten van slibverwijdering te onderscheiden zijn van de baggerwerkzaamheden.

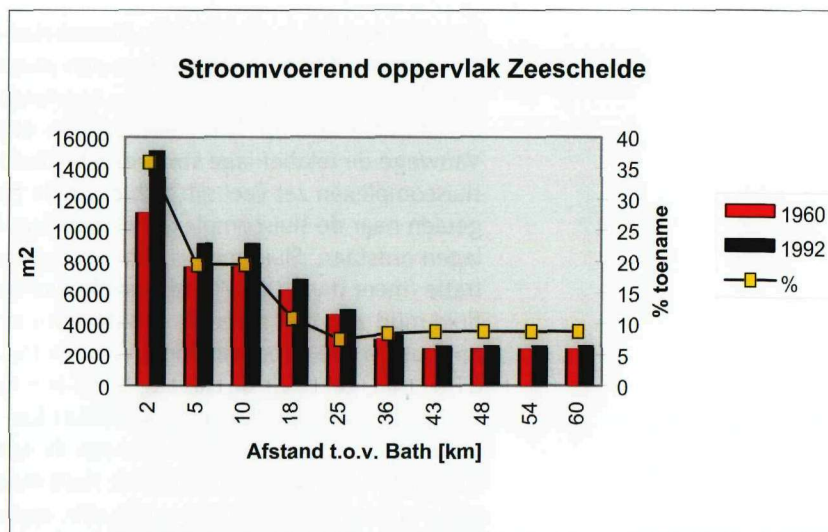
3. Ingrepen en veranderingen in het Schelde estuarium met invloed op de slibhuishouding

Het overgangsgedebied van rivier naar zee is in de loop der eeuwen door menselijke en natuurlijke veranderingen aan sterke verandering onderhevig geweest. De menselijke ingrepen zijn voortgekomen uit de wens tot bescherming tegen overstroming, verdediging van het land, scheepvaart-ontwikkeling en daarmee gepaard gaande industriële activiteit en zandwinning. In dit hoofdstuk worden de gevolgen van deze ingrepen voor de morfologie en de transportprocessen in het systeem onder de loep genomen. We zullen ons voornamelijk richten op de omgeving van de Beneden Zeeschelde.

3.1 Ingrepen in de infrastructuur van de Beneden Zeeschelde in de periode '60-'96

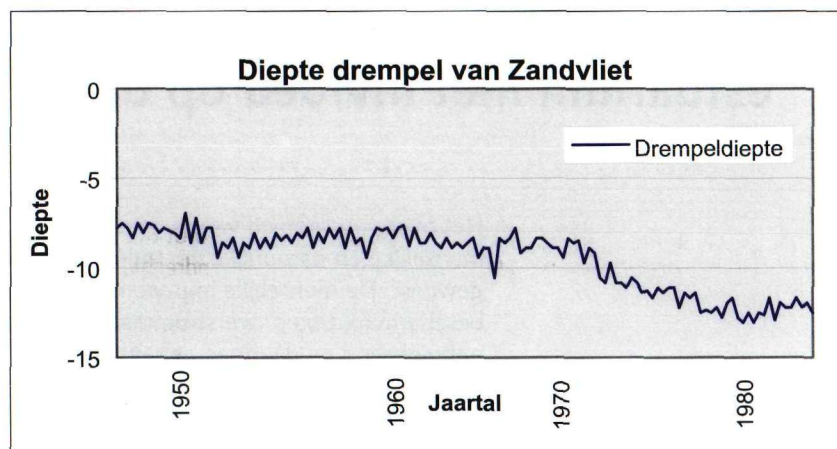
In de periode tussen 1960 en 1990 is er een aantal grote zeesluizen met toegangsgeulen aangelegd in de Beneden Zeeschelde, teneinde de toegankelijkheid van de havens langs de linker- en rechteroever van de Schelde voor schepen met grote diepgang te verbeteren. Deze zeesluizen verbinden het estuarium met de havendokken. De hoofdgeul in de Beneden Zeeschelde is in dezelfde periode eveneens sterk aangepast door het uitvoeren van omvangrijke baggerwerken.

Figuur 3.1: Het verloop van het doorstroomprofiel in de Beneden Zeeschelde over de periode 1960-1992.



De drempels zijn verdiept en het stroomprofiel van de geul is verruimd. Het gevolg van deze ingrepen is dat het estuarium in de Beneden Zeeschelde onnatuurlijk ruim in zijn jasje is komen te zitten. Door inpoldering is een deel van het kombergingsgebied in het estuarium verdwenen, terwijl het doorstroomprofiel verruimd is. De ontwikkeling van het gemiddelde doorstroomprofiel in de Beneden Zeeschelde tussen 1960 en 1992 wordt getoond in figuur 3.1.

Figuur 3.2: Ontwikkeling van de drempel van Zandvliet in de periode 1945-heden.



Uit figuur 3.1 blijkt dat het stroomvoerend oppervlak in de Beneden Zeeschelde is verruimd met 10 tot ruim 20%. Dit betekent dat de ligging van de bodem in de Beneden Zeeschelde duidelijk uit evenwicht is met de grootte van het getijdebiet. Dit wordt nogmaals geïllustreerd in figuur 3.2 van de omgeving van de drempel van Zandvliet, waaruit blijkt dat de natuurlijke ligging NAP -7.5 m is, in plaats van de huidige diepte van NAP -12.5 m. Een te ruim stroomprofiel betekent dat de eb- en vloedvolumina toe zullen nemen. Wanneer menselijk ingrijpen uitblijft, zal het stroomprofiel door sedimentatie op natuurlijke wijze weer afnemen. Dit geldt met name voor de toegangseulen naar de zeesluizen welke, gelegen in de luwte van de stroming in de rivier, ideale sedimentvangen zijn voor het fijne sediment.

De sedimentatie in de Beneden Zeeschelde wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de toegangseulen naar de zeesluizen en het schutten van deze sluizen. De belangrijkste zeesluizen zijn de Zandvliet en Berendrecht sluis op de rechteroever en de Kallosluis op de linkeroever. Vanwege de relatief lage stroomsnelheden in de toegangseulen naar deze sluiscomplexen zet veel slib zich af op de bodem van deze geulen. In de geulen naar de sluiscomplexen en net daar buiten, kunnen "fluid mud" lagen ontstaan. Fluid mud is een slib suspensie met een zeer hoge concentratie (meer dan 100 g/l). Als gevolg van deze hoge concentraties gedraagt fluid mud zich niet meer als een (Newtonse) vloeistof maar kan het sterkte opbouwen. De stroomsnelheid van een fluid mud laag kan oplopen tot 20 à 30 cm/s, zeker als de sliblaag langs een helling stroomt. In de omgeving van de toegangseul naar de Kallosluis kan de dikte van de fluid mud laag oplopen tot enkele meters. Vanwege de scherpe dichtheidsgradiënt op het scheidingsvlak tussen water en de fluid mud laag, wordt de turbulentie gedempt en is het niet eenvoudig slib, eenmaal gevangen in de fluid mud laag, weer op te wervelen. Vanwege de zeer hoge concentraties in de fluid mud laag, kan het transport van slib in deze laag aanzienlijk zijn. Verschillen in saliniteit tussen de rivier en de toegangseul en tussen de toegangseul en het sluiscomplex, zijn verantwoordelijk voor het opgang brengen van het transport van de fluid mud laag. De bodem van de toegangseul loopt redelijk horizontaal zodat stroming als gevolg van de zwaartekracht niet verwacht wordt. In de periode die begint pakweg twee uur voor het eind van de vloed en eindigt twee uur na het begin van de eb, is de saliniteit op de rivier aanmerkelijk hoger dan in de toegangseul naar het sluiscomplex. Als gevolg van het dichtheidsverschil dat hiermee gepaard gaat, stroomt zoutwater aan de bodem de toegangseul in. Dit zoutwater drijft de fluid mud laag aan. Bij het schutten van de sluizen

treedt eenzelfde verschijnsel op. Het water in de sluizen is zoeter dan het water in de toegangsgeul, zodat bij het openen van de sluisdeur zoutwater aan de bodem de sluis binnenstroomt. Aan het oppervlak zal sluiswater richting de toegangsgeul stromen. Op deze wijze wordt slib - al dan niet in hoge concentratie - vanuit de toegangsgeul richting de havendokken getransporteerd. De grootte van dit transport is moeilijk vast te stellen aan de hand van metingen.

De uitwisseling van slib tussen toegangsgeul en havendokken wordt dus bepaald door de schutfrequentie, welke bij de Zandvliet en Berendrecht sluizen hoog ligt. In paragraaf 2.3 is het troebelingsmaximum in de Beneden Zeeschelde ter sprake gekomen. Dit troebelingsmaximum bleek zich, afhankelijk van de rivierafvoer, tussen de Belgisch-Nederlandse grens en Antwerpen te bewegen. De lokatie van het troebelingsmaximum blijkt gevolgen te hebben voor de sedimentatie in de verschillende sluiscomplexen. Bij hoge rivierafvoer ligt het troebelingsmaximum in de omgeving van de Zandvliet en Berendrecht sluizen. In [Verlaan et al., 1997a] wordt melding gemaakt van verhoogde baggeractiviteit in de toegangsgeulen naar de Zandvliet Berendrecht sluizen in periodes met hoge rivierafvoer. Bij lage rivierafvoer vindt de sedimentatie voornamelijk in de toegangsgeul naar de Kallosluis plaats. De schutfrequentie van de Kallosluis is veel lager dan bij het Zandvliet-Berendrecht complex, waardoor de baggerwerkzaamheden zich concentreren in de toegangsgeul naar deze sluis

3.2 Bagger- en stortstrategie

Om de havendokken en de toegangsgeulen tot de zeesluizen bevaarbaar te houden, wordt er gebaggerd. Kort na aanleg van de Kallosluis bleek al dat de sedimentatie in de toegangsgeul erg groot was. Omdat de geul met het oog op de toegankelijkheid van de sluis op de gewenste diepte gehouden wordt, komt de grootte van de aanslibbing van de geul overeen met de hoeveelheid specie die gebaggerd wordt. Vanaf het begin van de jaren '90 wordt deze baggerspecie geborgen in diepe onderwatercellen in de Waaslandhaven, hetgeen erop neer komt dat het slib definitief aan het transport in de rivier onttrokken wordt

In de omgeving van de Zandvliet en Berendrecht sluizen is de situatie gecompliceerder. Sedimentatie vindt ook hier in eerste instantie plaats in de toegangsgeulen naar de zeesluizen. Tijdens het schutten van de sluizen wordt een deel van het slib dat onder in de toegangsgeul aanwezig is richting het havenbekken getransporteerd. Dit transport is niet iets van de laatste tijd, maar vindt sinds de aanleg van de Zandvlietluis plaats. Momenteel wordt het slib dat accumuleert in de toegangsgeul tijdens laagwater terug in de Beneden Zeeschelde geschoven ("Sweep beam baggeren"). Slib gebaggerd aan de dokzijde van de zeesluizen wordt voor een deel opgespoten op land en zo aan het transport onttrokken [Taverniers, 1997].

Het probleem is nu te bepalen hoeveel slib er door de zeesluizen naar de havendokken wordt getransporteerd. Deze hoeveelheid wordt in feite aan het transport onttrokken en is daarom van belang voor de slibbalans. Het netto transport door de zeesluizen is moeilijk direct te bepalen en wordt daarom vaak afgeleid van baggercijfers voor de havendokken. Bij het baggeren wordt echter niet alleen recent aangevoerd slib opgepakt maar zijn ook oudere slibafzettingen betrokken. Onbewust wordt het ene jaar meer gebaggerd dan er wordt aangevoerd (creëren van overdiepte), het andere jaar is het precies andersom. Wanneer de baggercijfers over een aantal jaar gemiddeld worden raken we het gesignaleerde bezwaar grotendeels kwijt. Een andere bron van onnauwkeurigheid is de omrekening van de bagger-

volumina naar massa slib welk cijfer in de slibbalans gebruikt wordt. Aannames omtrent de dichtheid van slib en het slibpercentage noodzakelijk voor deze omrekening, zijn aanleiding tot onzekerheden in het eindresultaat. In [Verliefde et al., 1994] wordt een slibbalans voor het gebied gegeven bepaald aan de hand van baggercijfers over de periode 1989-1993. De jaarlijkse aanvoer van slib door de zeesluizen die uit deze balans volgt is ruim 400 duizend ton. Dit mag als bovengrens beschouwd worden omdat i) al het sediment als slib is gekarakteriseerd en ii) de gebruikte dichtheid voor omrekening van baggervolumina naar massa slib aan de hoge kant is. Uit de gegevens aangeleverd door de Afdeling Maritieme Schelde van het Vlaams Ministerie [Claessens, 1993 & 1994; Taverniers, 1995-1997], volgt dat er in de periode '92-'95 jaarlijks gemiddeld ca. 200 duizend ton slib opgespoten is op land. Dit getal mag als ondergrens beschouwd worden voor het transport van slib door de Zeesluizen omdat - naast het slib dat op land opgespoten wordt - ook het slib dat geborgen wordt in overdiepten via de zeesluizen moet zijn geïmporteerd. Het laatste cijfer dat gepresenteerd wordt voor het transport van slib door de zeesluizen komt uit een studie uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium. In [Winterwerp, 1997] is aan de hand van de schuttfrequentie, het uitwisselingsdebiet tijdens het schutten en de slibconcentratie een inschatting gemaakt van het transport van slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de havendokken. Het slibtransport door de zeesluizen wordt ingeschat op 300 duizend tot 500 duizend ton per jaar. Dit transport is aan de hoge kant vanwege de wat te hoge slibconcentratie aan de rivierzijde van de sluizen die voor de berekening gebruikt is. Ook de aanname dat de uitwisseling van water (en slib) tijdens het schutten volledig is heeft hieraan bijgedragen. Met een realistischere waarde voor de slibconcentratie van het uitgewisselde water wordt een transport van 200 tot 300 duizend ton bepaald. Voorlopig stellen we het transport van slib door de Zandvliet en Berendrecht sluizen op 200 duizend ton. In paragraaf 4.7 zullen we echter terugkomen op het effect dat variatie van de grootte van deze post heeft op de slibbalans.

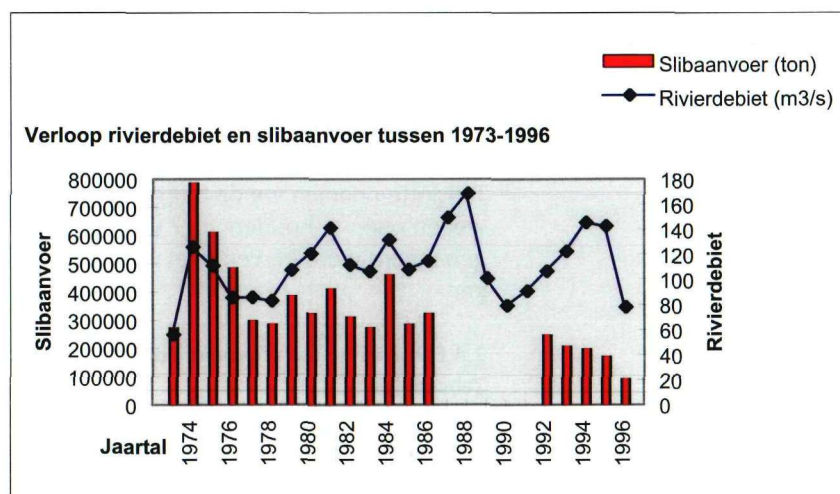
3.3 Aanvoer van slib via de rivier de Schelde

De aanvoer van slib via de rivier de Schelde wordt bepaald door het rivierdebiet en de slibconcentratie in het rivierwater. Het slib dat in suspensie met het rivierwater getransporteerd wordt, is grotendeels afkomstig van oevererosie en mag als anorganisch slib beschouwd worden [Taverniers, 1997]. Een ander deel is afkomstig uit lozingen van afvalwater van industrie en bevolking. Het industrieel en huishoudelijk slib dat geloosd wordt op de Schelde en haar zijtakken bevat een aanzienlijk deel organisch materiaal (60-70% [Van Maldegem, 1993a]). Door natuurlijke processen wordt dit organisch materiaal grotendeels afgebroken en omgezet in water en kool-dioxyde voor het bij Rupelmonde de Beneden Zeeschelde bereikt. In [Van Maldegem, 1993a] wordt uitgegaan van volledige afbraak voordat het slib Rupelmonde bereikt.

De meest gebruikte methode om de jaarlijkse aanvoer van fluviatiel slib te bepalen is de slibconcentratie te vermenigvuldigen met het rivierdebiet. Dit debiet wordt gemeten bij de stuwen in de rivier waar de getijwerking niet meet aanwezig is of bij de opwaartse rand van het getijbekken. Het bezwaar dat tegen deze methode in het estuarium bestond wordt op de rivier zo vermeden. Bij de stuwen stroomt het rivierwater maar één kant op, zodat het samenstellen van tegengesteld gerichte transporten vermeden wordt. De getij invloed in het Schelde bekken is echter tot ver stroomopwaarts merkbaar (hoofdstuk 2) waardoor we genoodzaakt zijn de bijdrage van alle zijtakken van de Schelde in de beschouwing mee te nemen. Het

totale transport van fluviatiel slib wordt aldus uit de bijdragen van de Nete, Zenne, Dijle, Dender en Boven Zeeschelde bepaald op basis van maandelijkse metingen van rivierdebiet en de concentratie gesuspendeerd materiaal. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen organisch en anorganisch materiaal, zodat we in wezen spreken over de aanvoer van zwevend materiaal met een korrelgrootte $<63\mu\text{m}$. Op deze wijze wordt sinds 1973 (met een onderbreking tussen 1987 en 1991) de slibaanvoer van de Schelde bepaald. Deze aanvoer is gemiddeld over de jaren '73-'86 ca. 400 duizend ton droge stof per jaar. De laatste vijf jaar ('92-'96) de slibaanvoer echter sterk afgenomen is. Een mogelijke oorzaak de variatie van het rivierdebiet kunnen zijn. Een groot rivierdebiet zorgt over het algemeen voor een grote aanvoer van slib. In natte jaren wordt de rivierbodem als het ware schoongespoeld en wordt het slib dat zich in droge seizoenen in de riviertakken heeft verzameld, stroomafwaarts getransporteerd (wasregime).

Figuur 3.3: De aanvoer van water en slib door de rivier de Schelde tussen 1973 en 1996.



In figuur 3.3 is het rivierdebiet en de slibaanvoer over de periode 1973-1996 uitgezet. De jaren 1994 en 1995 blijken juist relatief nat te zijn geweest waardoor er juist een sterke slibaanvoer van slib te verwachten is. De lage waarde van 1996 kan wel weer verklaard worden door het lage rivierdebiet en het wasregime in de twee jaren ervoor. Blijkbaar is variatie in rivierdebiet niet de enige factor die verantwoordelijk is voor de lage slibaanvoer de laatste jaren. Er is nog een tweetal andere redenen te geven voor de afname van de slibaanvoer via de Schelde:

- Vanaf 1990 worden in toenemende mate rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) op Belgisch en Frans grondgebied in gebruik genomen voor zowel huishoudelijk als industrieel afvalwater. In 1991 was de zuiveringsgraad van het afvalwater in het Franse deel 41%, in Wallonië 25%, in Brussel 0%, in Vlaanderen 27% en in het Nederlandse deel van het stroomgebied 93% [De Water, 1995]. Inmiddels is dit percentage in Vlaanderen toegenomen tot 35% [De Water, 1997] en de verwachting is dat in het jaar 2003 de 60% gehaald zal worden [Taverniers, 1997]. In Brussel zijn momenteel nog geen RWZI's in gebruik. De verwachting is dat bij in gebruik name van de eerste RWZI in Brussel het zuiveringspercentage rond de 30% komt te liggen. De lintbebouwing in Vlaanderen en Wallonië voorkomt echter dat hetzelfde zuiveringspercentage als in Nederland gehaald kan worden [De Water, 1995]. Er is geen gescheiden afvoer van (huishoudelijk) afvalwater, water afkomstig uit agrarische gebieden en neerslag. Deze laatste twee bronnen bevatten voornamelijk anorganisch materiaal. Zuivering van dit water in

RWZI's leidt tot een reductie van de slibvracht naar de Beneden Zeeschelde. Bij zuivering in een RWZI wordt naar schatting 90% van het slib afgevangen en permanent uit het watersysteem onttrokken. Het slib aanwezig in huishoudelijk afvalwater heeft echter een hoog organisch gehalte (60-70%). Door natuurlijke processen wordt dit organisch materiaal nu al grotendeels afgebroken en omgezet in water en kool-dioxyde voor het bij Rupelmonde de Beneden Zeeschelde bereikt. Het zuiveren van meer huishoudelijk afvalwater in RWZI's draagt daarom slechts in beperkte mate bij aan de afname van de slibtoevoer naar het Schelde estuarium [Verlaan, 1997b]

- In het stroomgebied is sinds een jaar of zeven afgestapt van het "normaliseren" van de waterlopen, waarbij water en slib zo snel mogelijk vanuit het stroomgebied afgevoerd werd naar de Westerschelde. Momenteel wordt gebruik gemaakt van wachtbekkens en stuwen om de afvoer van grote hoeveelheden neerslagwater beter te kunnen reguleren. Het slib dat in de wachtbekkens bezinkt wordt later veelal definitief verwijderd uit het watersysteem [Taverniers, 1997]. Ook de onbevaarbare waterlopen die maar weinig water afvoeren doen dienst als wachtbekken. Ook vanuit de riviertakken wordt slib verwijderd. Exacte cijfers ontbreken echter.

Tenslotte noemen we de baggeractiviteiten op de kanalen. Om deze vaarwegen open te houden voor scheepvaart moeten de geulen regelmatig gebaggerd worden. Een deel van de baggerspecie wordt op land opgeslagen.

3.4 Een kort historisch overzicht van de slibhuishouding in de Beneden Zeeschelde

Na de opsomming van de bronnen en putten van slib is het nu tijd geworden de processen in de Beneden Zeeschelde verantwoordelijk voor het transport op een rijtje te zetten. Aangegeven wordt welke transportprocessen gewijzigd kunnen zijn door slibverwijdering en op welke wijze de waterkwaliteit daardoor beïnvloed kan zijn. Het gaat er echter nog niet om effecten te kwantificeren. Het leggen van relaties tussen transport en waterkwaliteit staat nu centraal.

Voor 1986 lag de langjarig-gemiddelde slibaanvoer vanaf de rivier de Schelde in de orde 350 à 400 duizend ton per jaar. Circa een derde deel van deze hoeveelheid heeft een zeer kleine korrelgrootte en blijft permanent in suspensie [Van Maldegem, 1993a]. Sedimentatie vond plaats in de toegangsgeulen voor de sluizen, waarvan een deel bij het schutten van de sluizen naar de dokken verdween. De aanleg van de Kallosluis heeft de totale sedimentatie in de Beneden Zeeschelde sterk doen toenemen. Het gesedimenteerde slib werd bij baggerwerken voor het overgrote deel in de Beneden Zeeschelde teruggestort. Bij het baggeren aan de rivierzijde van de sluizen werd voornamelijk slib verplaatst en niet uit het systeem verwijderd. In de sluizen en havendokken werd ook in deze periode wel slib onttrokken (Zandvliet). Doordat het slib bij het baggeren vaak beroerd werd bleef het mobiel en was de kans groot dat het slib uiteindelijk in een natuurlijk sedimentatie gebied terecht kwam. Een ander deel werd direct of via een tussenstop in de toegangsgeulen naar de havendokken richting de Westerschelde getransporteerd.

In de periode '64-'86 is de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde toegenomen met 100 duizend ton per jaar [Bastin, 1993]. Dit getal is in werkelijkheid nog groter doordat het een netto resultante is van bruto aangroei van de bodem en slibverwijdering uit de bodem vanwege

de aanleg van de Kallosluis met toegangsgeul, waarbij een grote hoeveelheid slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde verwijderd is [Verlaan, 1997a].

Teneinde verwarring te voorkomen is het goed om even stil te staan bij wat wij onder erosie verstaan, omdat onze definitie enigszins afwijkt van de meest gangbare. Standaard wordt met erosie de afslijting van land door stroming en golven bedoeld. Zo kan lokaal erosie optreden als gevolg van stroming in een geul of het verplaatsen van een geul. Erosie is dus sterk gerelateerd aan bodemveranderingen. Nu bestaat de bodem van de Westerschelde en Beneden Zeeschelde uit een harde (Boomse) kleilaag, bedekt met een laag zandig sediment. Dit sediment bestaat slechts voor een klein percentage uit slib. Wanneer dit sediment getransporteerd wordt door stroming en golfactiviteit, zal de verplaatsing van het slib nauwelijks effect hebben op de bodemligging.

In het vervolg van dit rapport wordt met erosie van slib uit de bodem het "uitspoelen" van slib uit zandig bodemsediment bedoeld als gevolg van de microdynamiek in de bodem, zonder dat dit consequenties heeft voor de morfologie van het estuarium. In feite verandert bij erosie van slib uit de bodem slechts het slibgehalte in het sediment. Voor sedimentatie geldt een soortgelijk verhaal, waarbij slib "ingevangen" wordt in de bodem en het slibgehalte van het sediment juist toeneemt.

Met nadruk wordt erop gewezen dat de aangroei van de hoeveelheid slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde een netto effect is. Het betekent niet dat er geen uitwisseling is van slib tussen de bodem en het water. De bodem van het estuarium is namelijk zeer dynamisch. Naar schatting één à twee keer per jaar wordt de bovenste halve meter van de bodem van de Westerschelde omgewoeld door de migratie van microribbels en zandgolven [Van Maldegem et al., 1993b]. De bodem van de Beneden Zeeschelde is anders van aard. Tussen Rupelmonde en de stad Antwerpen bestaat de bodem grotendeels uit (geconsolideerde) Boomse Klei met slechts enkele zandige platen. Stroomafwaarts van Antwerpen is deze Boomse klei afgedekt met enkele decimeters zandig sediment. Bij omwoeling kan slib uit de zandige bodem geërodeerd worden en naar andere delen van het estuarium getransporteerd kunnen worden (Westerschelde). Dit mechanisme speelt een essentiële rol bij het verversen van het bodemsediment. De hoeveelheid slib die rond kentering weer door de bodem ingevangen wordt is echter op jaarbasis 100 duizend ton groter dan de erosie, waardoor er netto aangroei van de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde heeft plaatsgevonden.

Naast fluviatiel slib, wordt er voor een belangrijk deel slib afkomstig uit zee in de Beneden Zeeschelde aangetroffen (zie paragraaf 2.3). De verwachting is dat de aanleg van de toegangsgeulen naar de havens ertoe heeft geleid dat het netto transport van marien slib van de Westerschelde naar de Beneden Zeeschelde toe is genomen. De toegangsgeulen zijn relatief diep en fungeren als extra sedimentatie gebied in de Beneden Zeeschelde. Marien slib dat bij vloed de Beneden Zeeschelde binnen stroomt blijft voor een groter gedeelte dan vroeger het geval was bij eb achter. Door de baggerwerkzaamheden die de geulen op diepte houden wordt dit mechanisme in stand gehouden.⁴

In de jaren negentig blijkt de aanvoer van slib vanaf de Schelde significant

.....
⁴ Voor de aanslibbing maakt het echter geen verschil of het slib bij het baggeren uit het systeem verwijderd wordt of wordt teruggeschoven in de vaargeul. Het is het volume van de toegangsgeul dat de aanslibbingssnelheid bepaalt

lager te liggen en nemen we een gemiddelde waarde van ca. 200 duizend ton per jaar aan (over de periode '87-'91 zijn geen gegevens beschikbaar). Er zijn geen redenen aan te nemen dat de korrelgrootteverdeling van het rivierslib veranderd is, waardoor ook nu ca. een derde deel van het slib in suspensie naar de Westerschelde afgevoerd zal worden. Absoluut gezien wordt er echter minder fluviatiel slib direct naar de Westerschelde getransporteerd. Afhankelijk van de kwaliteit van dit slib kan deze afname in slibtransport gevolgen voor de waterkwaliteit in de Westerschelde hebben. De toegangsgeulen en de havendokken fungeren nog steeds als een zeer efficiënt vangnet voor slib. Vanuit de toegangsgeul naar de Kallosluis wordt het slib echter niet meer terug in de vaarweg geschoven (sweep-beam) maar geborgen in diepe onderwatercellen, waardoor het slib dat in deze toegangsgeul sedimenteert niet meer de gelegenheid krijgt elders te bezinken (luwtegebieden, slikken en schorren). Het slib dat uit de toegangsgeul verwijderd wordt, is een mengsel van recent aangevoerd marien - en fluviatiel slib en vroeger afgezet slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde. Afhankelijk van de verhouding tussen deze componenten levert de slibverwijdering een bijdrage aan de verbetering van de water- en bodemkwaliteit op Nederlands grondgebied. In de toegangsgeul naar de Zandvlietsluis wordt het sweep-beam baggeren nog steeds toegepast waardoor het slib in het watersysteem blijft. Vanuit de havendokken gelegen achter de sluizen wordt echter slib verwijderd.⁵

De bodem van de Beneden Zeeschelde bevat een grote hoeveelheid slib [Bastin, 1993]. Het feit dat dit slib in een eerder stadium gesedimenteerd is in de Beneden Zeeschelde duidt er op dat het materiaal met een relatief grove korrel betreft (het fijnste materiaal blijft permanent in suspensie en verdwijnt naar de Westerschelde). Verwijdering van slib uit de toegangsgeulen vanwege de WVO-vergunning, kan een afname van de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde tot gevolg hebben. In eerste instantie wordt de hoeveelheid slib die in suspensie komt bij omwoeling van de bodem niet beïnvloed door de slibverwijdering. Tijdens lage stroomsnelheden zal het slib uit de bodem een voorkeur hebben te sedimenteren wanneer er geschikte lokaties in de omgeving zijn. Op deze manier verdwijnt een deel van het slib uit de bodem naar de toegangsgeulen en havendokken en wordt zo uit het systeem verwijderd. De hoeveelheid slib die rond stroomkentering door de bodem ingevangen kan worden neemt hierdoor echter af. De verwijdering van slib uit de havengebieden leidt er toe dat de bruto sedimentatie van slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde afneemt, waardoor de netto sedimentatie om slaat in een netto erosie. Een deel van het geërodeerde slib komt in de toegangsgeulen en havendokken terecht en zal daar verwijderd worden (in wezen wordt slib dat "voor de bodem bestemd is" uit het systeem verwijderd).

Omdat de slibverwijdering een extra transport veroorzaakt van de bodem naar land, wordt de verblijfstijd van slib in de bodem verkort. Ook slib dat in de jaren zeventig in de bodem is afgezet en over het algemeen een slechtere kwaliteit heeft, zal in sterkere mate uitgewisseld worden met de waterkolom. Omdat er minder vers slib wordt aangevoerd neemt het aandeel oud slib in het geërodeerde materiaal toe. De slibverwijdering leidt dus tot een versnelde vorm van bodem sanering. Sanering van de bodem op deze wijze vergt, gezien de grootte van het transport in vergelijking met de voorraad vervuild slib in de bodem, minimaal één à twee decennia [Van

.....
⁵ Voor de verwijdering kwam het slib ook al in de geulen terecht maar werd vandaar weer terug in het systeem geschoven waar door het slib een nieuw kans kreeg op een "natuurlijke" lokatie te sedimenteren

Maldegem et al., 1993b]. Het slib dat vanuit de Beneden Zeeschelde de Westerschelde bereikt zal voor een groter deel uit oud bodemslib bestaan. Wat de gevolgen zijn voor de waterkwaliteit zal in hoofdstuk 5 en 6 aan de orde gesteld worden.

Samengevat kunnen de volgende transportprocessen - van invloed op de waterkwaliteit in de Westerschelde - beïnvloed zijn door de slibverwijdering in de periode '92-'96:

- de grootte van het transport van recent aangevoerd fluviatiel slib van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde. Rekening moet gehouden worden met de afgenomen vracht aan rivierslib over deze periode.
- de grootte van het transport van vroeger afgezet slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde. Er is reden om aan te nemen dat slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde vermindert door de slibverwijdering. De kwaliteit van dit bodemmateriaal is relatief slecht.

We willen graag kwantificeren of het slibtransport rond de Belgisch-Nederlandse grens beïnvloed is door de slibverwijdering. Hiertoe worden slibbalansen voor de Beneden Zeeschelde voor de periodes met en zonder slibverwijdering opgesteld in hoofdstuk 4. Bij het opstellen van de balansen wordt sterk geleund op de baggergegevens.

Er is tamelijk veel informatie beschikbaar over het slibpercentage in de drempels in de Beneden Zeeschelde. Wanneer we de ontwikkeling van het slibpercentage op de drempels in de Beneden Zeeschelde representatief mogen beschouwen voor de gehele bodem van de Beneden Zeeschelde, is uit deze ontwikkeling het verloop van de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde af te leiden. Dit is een alternatief voor de methode Bastin welke een globaal beeld geeft omtrent het verloop van de slibvoorraad in de totale bodem van de Beneden Zeeschelde. Met behulp van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding in het organisch materiaal in het slib kan zeeslib van rivierslib onderscheiden worden. Ook deze verhouding levert waardevolle informatie met het oog op de slibbalans.

In hoofdstuk 5 passeren andere veldgegevens de revue en wordt onderzocht of deze de conclusies uit hoofdstuk 4 ondersteunen.

4. Beschrijving van de gevolgde aanpak

4.1 De methodiek: van slibbalans naar waterkwaliteit

Het streven naar een verbetering van de water- en bodemkwaliteit in de Westerschelde heeft ten grondslag gelegen aan de bepaling in de WVO-vergunning waarin de slibverwijdering uit de Beneden Zeeschelde is vastgelegd. De redenering is als volgt: in het stroomgebied van de Schelde wordt tot op heden in grote mate ongezuiverd rioolwater geloosd. Het betreft hier zowel huishoudelijk als industrieel afvalwater. Via afwateringskanalen belandt dit rioolwater uiteindelijk bij Rupelmonde in de Beneden Zeeschelde, alwaar de rivieren de Schelde en Rupel samenkomen. Met dit rioolwater wordt een scala aan contaminanten op het Schelde stroomgebied. Een aantal van deze stoffen zal de voorkeur hebben zich aan slibdeeltjes te binden (o.a. spoormetalen en organische microverontreinigingen). In eerste instantie aan het slib dat met het rioolwater afgevoerd wordt, maar later ook aan het slib dat al in het watersysteem aanwezig is. Een deel van het slib dat via de rivieren op het Schelde estuarium geloosd wordt, zal in suspensie met het rivierwater de Westerschelde bereiken. De korrelgrootte van de slibdeeltjes speelt hierbij een belangrijke rol. Wanneer nu tijdens baggerwerken slib uit de Beneden Zeeschelde verwijderd wordt zullen de contaminanten die zich aan het slib gehecht hebben eveneens uit het watersysteem verdwijnen waardoor deze niet meer de Westerschelde kunnen bereiken. Slibverwijdering heeft in deze redenering een positief effect op de waterkwaliteit van de Westerschelde. Hoe hoog deze bijdrage aan de waterkwaliteitsontwikkeling kan oplopen, hangt af van de grootte van de verwijdering relatief ten opzichte van de hoeveelheid slib die aangevoerd wordt (m.a.w. welk deel van het verwijderde slib stroomde voorheen verder naar de Westerschelde) en de lokatie waar de verwijdering plaatsvindt. Wellicht nog belangrijker is de bijdrage van de slibverwijdering aan de waterkwaliteitsverbetering vergeleken met het effect van andere maatregelen die in dit kader genomen zijn. De voornaamste maatregel is de reductie van de emissies van een groot aantal stoffen die vanaf het midden van de jaren '80 doorgevoerd zijn. De centrale vraag die beantwoord dient te worden is derhalve óf de invloed van de slibverwijdering merkbaar is op de waterkwaliteit in de Westerschelde en zo ja, of deze kwaliteitsverbetering significant is ten opzichte van de effecten van emissie reducties.

In principe zijn er twee wegen te bewandelen wanneer we het effect van de slibverwijdering op de waterkwaliteit in de Westerschelde willen aantonen. We kunnen proberen dit effect rechtstreeks vast te stellen door metingen van waterkwaliteitsparameters voor en na de slibverwijdering met elkaar te vergelijken. Het is onzeker of het effect voldoende groot is om aangetoond te kunnen worden en of het te isoleren is van bijdragen van andere maatregelen aan een verbeterde waterkwaliteit. Het vermoeden bestaat dat het effect van de onttrekking maar klein is ten opzichte van de kwaliteitsverbetering die zich de afgelopen jaren in het estuarium heeft voorgedaan als gevolg van emissie reducties. Ook erosie van oude sliblagen (denk aan schorerosie) met een afwijkende kwaliteit kan vertroebelen werken op een trend in de waterkwaliteit door de slibverwijdering. Daarom bewandelen we een andere weg om het effect van de slibverwijdering aan het licht te brengen.

Een directe methode is ons te concentreren op de slibverwijdering zelf en de relatie met de waterkwaliteit even op het tweede plan te plaatsen. Het verwijderen van significante hoeveelheden slib uit de Beneden Zeeschelde leidt tot een verstoring van de slibhuishouding in dit gebied. Op termijn zal het transport tussen de Beneden Zeeschelde en de Westerschelde hierdoor beïnvloed kunnen worden. Zijn er aanwijzingen in het veld te vinden waaruit blijkt dat het transport van slib in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens de afgelopen jaren gewijzigd is, en zo ja welke rol speelt de slibverwijdering hierin? In eerste instantie zijn we geïnteresseerd in het residueel transport van slib over de Belgisch-Nederlandse grens, ook wel het netto transport genoemd. Dit residueel transport is een kleine resultante van de grote hoeveelheid slib die bij vloed het estuarium in - en bij eb het estuarium uit wordt getransporteerd. Dit transport is niet uit metingen van stroomsnelheid en slibconcentratie te bepalen. De fout die namelijk gemaakt wordt bij het bepalen residueel transport uit twee tegengesteld gerichte transporten, is van dezelfde orde grootte als het residueel transport zelf. In plaats daarvan hanteren we een balans aanpak, waarin de termen in de balans staan voor de residuele transporten. Hieronder vallen de aanvoer van slib vanaf de Schelde en vanuit zee, erosie en sedimentatie, bagger- en stortactiviteiten, zandwinning en opslag in de bodem. De periode waarover een balans wordt bepaald is daarom meestal in de orde van een jaar of meer omdat termen als erosie en sedimentatie op kortere termijn niet voldoende nauwkeurig te bepalen zijn in het veld of te veel door seizoensverschillen beïnvloed worden.

Er kleeft echter ook een nadeel aan de balans aanpak. In de slibbalans wordt slechts een netto transporteffect vermeld waarbij ervan uitgegaan wordt dat marien slib van zee komt en fluviatiel slib vanaf de rivier. Buiten de beschouwing wordt gelaten dat er uitwisseling van slib tussen Beneden Zeeschelde en Westerschelde kan plaatsvinden zonder dat dit met netto transport gepaard gaat. Bij eb stroomt er slib met het water mee van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde, bij vloed gaat een zelfde hoeveelheid (deels) ander slib weer richting Beneden Zeeschelde. Wanneer de samenstelling fluviatiel/marien van aan en afgevoerd slib min of meer gelijk is, zal deze uitwisseling niet terug te vinden zijn in de veldgegevens.⁶ In de slibbalans wordt aangenomen dat fluviatiel slib afkomstig is vanaf de rivier en marien slib vanaf zee. Niet uit te sluiten - en zelfs waarschijnlijk - is het dat er bij vloed fluviatiel slib vanaf de Westerschelde naar de Beneden Zeeschelde getransporteerd wordt, maar er een grotere hoeveelheid bij eb vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde getransporteerd wordt. De (bruto) uitwisseling van slib is veel groter dan het (netto) transportcijfer dat in slibbalans vermeld wordt.

We moeten er ons voor waken dat we ons niet blind staren op de cijfers die uit de balans volgen

Ook bij de balans aanpak speelt het probleem dat de slibverwijdering niet het enige proces is dat van invloed kan zijn op het transport van slib rond de grens. Wijzigingen in de hydrodynamica in de directe omgeving en in de aanvoer van slib vanaf de Schelde en vanuit zee spelen ook een rol van betekenis in de evolutie van de slibbalans.

Ondanks het feit dat ook in het slibtransport meerdere ingrepen door elkaar lopen lijkt de aanpak om het effect van de slibverwijdering op de

.....
⁶ Nog duidelijker wordt het voorbeeld wanneer we ons beperken tot één fractie, zeg fluvial slib. Bij eb stroomt een zekere hoeveelheid fluviatiel slib richting zee en bij eb wordt een zelfde hoeveelheid (deels anders) fluviatiel slib in tegengestelde richting getransporteerd. Netto is er geen transport, maar dit zegt niks over uitwisseling.

waterkwaliteit via de slibbalans aan te tonen de meest kansrijke. Op voorhand kunnen we namelijk al zeggen dat - gezien de slib kwantiteit die met de slibverwijdering gemoeid is - het optreden van significante effecten in de slibbalans aannemelijk is. We zullen in eerste instantie deze weg bewandelen. Hiertoe zullen slibbalansen karakteristiek voor de periode voor - en na slibverwijdering opgesteld worden. Deze balansen zullen gebaseerd zijn op veldgegevens en worden met elkaar vergeleken. De geconstateerde verschillen zullen waar mogelijk in verband gebracht worden met de slibverwijdering en uiteindelijk zal het effect van de slibverwijdering op de verschillende balans termen zoveel als mogelijk geïdentificeerd worden. De wijzigingen in de slibbalans als gevolg van de slibverwijdering zullen doorvertaald worden naar effecten op de waterkwaliteit. Hiervoor wordt in eerste instantie een "common sense" benadering gevolgd: door de slibtransport kwantiteit te koppelen aan de kwaliteit ervan kan een contaminantenvracht van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde berekend worden. De bijdrage van de slibverwijdering aan de vermindering van deze vracht zal afgezet worden tegen de bijdrage van andere maatregelen (o.a. emissie reductie).

Tenslotte zal het waterkwaliteitsmodel ingezet worden om de effecten van de slibverwijdering in meer detail te berekenen. Dit model maakt voor het slibtransport gebruik van een slibbalans. Berekeningen zullen uitgevoerd worden waarbij naast de slibbalans geen andere wijzigingen in de modelsetting worden doorgevoerd. Hiermee wordt het effect van de slibverwijdering op de waterkwaliteit geïsoleerd.

4.2 Slibbalansen van de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde in de periode '60-'96

We hebben de beschikking over een aantal slibbalansen die er voor verschillende periodes vanaf de jaren '60 opgesteld zijn. We zullen de verschillende balansen kort even bespreken om de verschillen en overeenkomsten aan het licht te brengen.

Over de periode '64-'86 is door Verlaan een slibbalans van de Beneden Zeeschelde opgesteld [Verlaan et al., 1997a]. Deze balans is gebaseerd op langjarig gemiddelde gegevens van de balansposten. Er wordt slechts beperkt onderscheid gemaakt tussen fluviatiel - en marien slib. De volgende balansposten zijn onderscheiden: aanvoer van fluviatiel slib van de Schelde, aanvoer van marien slib uit de Westerschelde, afvoer van fluviatiel slib naar de Westerschelde, verwijdering van slib uit de Beneden Zeeschelde, afvoer van slib naar de havenbekkens en het verloop van de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde. De afvoer van slib naar de havenbekkens en het verloop van de hoeveelheid slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde zijn de onzekere termen in de balans. De sluitterm van de balans is het transport naar de Westerschelde. Hierdoor komt de onzekerheden in de overige balansposten tot uiting in de post waarin onze interesse nu net gelegen is. In paragraaf 4.1 is aangegeven dat hieraan niet te ontkomen valt omdat de directe bepaling van het transport op de Belgisch-Nederlandse grens niet mogelijk is.

In de periode '64-'86 is nog geen sprake van slibverwijdering zoals bedoeld in de WVO-vergunning onderhoudsbaggerwerk.

Vanaf '92 is door de Afdeling Maritieme Schelde van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (AMS) elk jaar een slibbalans voor de Beneden Zeeschelde geproduceerd [Claessens, 1993 & 1994; Taverniers, 1995-1997]. Het opstellen van een slibbalans van de Beneden Zeeschelde is als verplichting opgenomen in de WVO-vergunning onderhoudsbaggerwerk.

In deze balansen is van jaar tot jaar de verwijderde hoeveelheid slib verwerkt tezamen met de actuele aanvoer vanaf de rivier de Schelde. Er wordt in deze balansen geen onderscheidt gemaakt in de herkomst van het slib. Van een echte balans is eigenlijk geen sprake omdat niet alle posten gekwantificeerd worden waardoor de balans niet gesloten kan worden. De uitwisseling tussen Beneden Zeeschelde en Westerschelde en de rol die de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde speelt behoren tot deze categorie. Er wordt geen onderscheidt gemaakt tussen marien - en fluviatiel materiaal.

De balansen van de Beneden Zeeschelde van de AMS hebben aan de basis gestaan voor een gemiddelde balans over de periode '92-'95 gerapporteerd in [Van Maldegem, 1997]. De gegevens in deze balansen zijn aangevuld met gegevens over het percentage slib in het sediment en met informatie omtrent de verhouding fluviatiel/marien in het slib, waarmee in de balans de fractie fluviatiel slib onderscheiden kan worden van het slib afkomstig van zee. Ook wordt in deze balans een getal genoemd voor de grootte van de uitwisseling van slib tussen de Beneden Zeeschelde en de Westerschelde. Sluitpost in de fluviatie balans tak is onttrekking van slib uit de bodemvoorraad en in de mariene balans tak de aanvoer uit de Westerschelde.

Voor de Westerschelde als geheel zijn er onder andere de balansen van Van Maldegem [Van Maldegem, 1993b] en Vereeke [Vereeke, 1994]. De beide balansen zijn tot stand gekomen door per gebied balansvergelijkingen op te stellen waarin het verloop van de massa slib als functie van rivieraanvoer, sedimentatie en erosie en baggeractiviteit is vastgelegd. Er wordt in de balansen onderscheidt gemaakt tussen slib afkomstig van zee (marien) en slib afkomstig van af de rivier de Schelde (fluviatiel). Het onderscheid tussen marien - en fluviatiel slib wordt gemaakt aan de hand van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding van het organisch materiaal in het slib. De sedimentatie op de schorren in de Westerschelde is afgeleid van de sedimentatie op het Land van Saeftinge. Er wordt in deze balansen geen actieve rol toebedeeld aan de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde. De sluitpost in de balans van de fractie marien slib is de import vanaf zee. De "rekenrichting" bij het oplossen van de balansvergelijkingen is van Rupelmonde (rivier de Schelde) naar Vlissingen (monding estuarium). Hierdoor werken de fouten die in het stroomopwaarts gelegen deel van het estuarium gemaakt worden door in de meer zeewaarts gesitueerde gebieden. De onzekerheden in de balansposten nemen dan ook toe in zeewaartse richting. De balans van Van Maldegem is geldig voor de situatie zoals die gold aan het begin van de jaren tachtig. In de balans van Vereeke is de eerste slibverwijdering verwerkt en deze is representatief voor het begin van de jaren '90. Met deze balansen kan het effect van wijzigingen in de slibhuishouding in de Beneden Zeeschelde op de Westerschelde in beeld gebracht worden.

Tenslotte is in [Ten Brinke, 1992] een gevoeligheidsanalyse van de slibbalansen van de Westerschelde uitgevoerd. Met name de uitwisseling van slib tussen Westerschelde en Noordzee bleek gevoelig te reageren op verstoringen.

Al deze balansen zijn in grote mate gebaseerd op dezelfde veldgegevens. Zo zijn de gegevens omtrent de gebaggerde hoeveelheden slib in het Antwerpse havengebied en de aanvoer van slib via de rivier de Schelde in alle gevallen afkomstig van de AMS. De verschillen tussen de balansen worden geïntroduceerd doordat de periode waarover ze opgesteld zijn, verschilt (variatie in slibaanvoer via de rivier de Schelde) en doordat is som-

mige balansen bepaalde balanstermen buiten de beschouwing zijn gelaten. In de balansen van de Beneden Zeeschelde is bijvoorbeeld de slibvoorraad in de bodem opgenomen als post. Deze post blijkt een cruciale rol te spelen in de balans voor de Beneden Zeeschelde na invoering van de slibverwijdering. Deze balanspost is niet aanwezig in de beide balansen van de Westerschelde. Dit speelt een complicerende rol bij het isoleren van het effect van de slibverwijdering in de slibbalans. Hoe meer de balansen langs dezelfde lijn zijn opgesteld en uitgaan van dezelfde balanstermen, des te eenvoudiger het wordt de resterende verschillen in verband te brengen met de slibverwijdering. Gezien het belang dat de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde speelt in de recente slibbalans, richten we ons voorlopig op de Beneden Zeeschelde. Hierdoor wordt het uitgangspunt voor de slibbalansen in de vergelijking zoveel mogelijk gelijk gehouden. In de verzameling slibbalansen voor dit gebied gaan we op zoek naar balansen representatief voor de periode voor - en na de slibverwijdering, die op zo min mogelijk essentiële punten van elkaar verschillen.⁷

4.3 Slibbalans representatief voor de periode voor de slibverwijdering (midden jaren tachtig)

In de voorgaande paragraaf is besloten ons in eerste instantie te beperken tot de Beneden Zeeschelde. Dit leidt er toe dat we in wezen slechts één slibbalans over houden uit de reeks die in paragraaf 4.2 is opgesomd [Verlaan et al., 1997a]. Om aan te geven dat deze balans niet op zichzelf staat, wordt deze toch even naast de balans uit [Van Maldegem, 1993b] gehouden.

4.3.1 Balans Verlaan

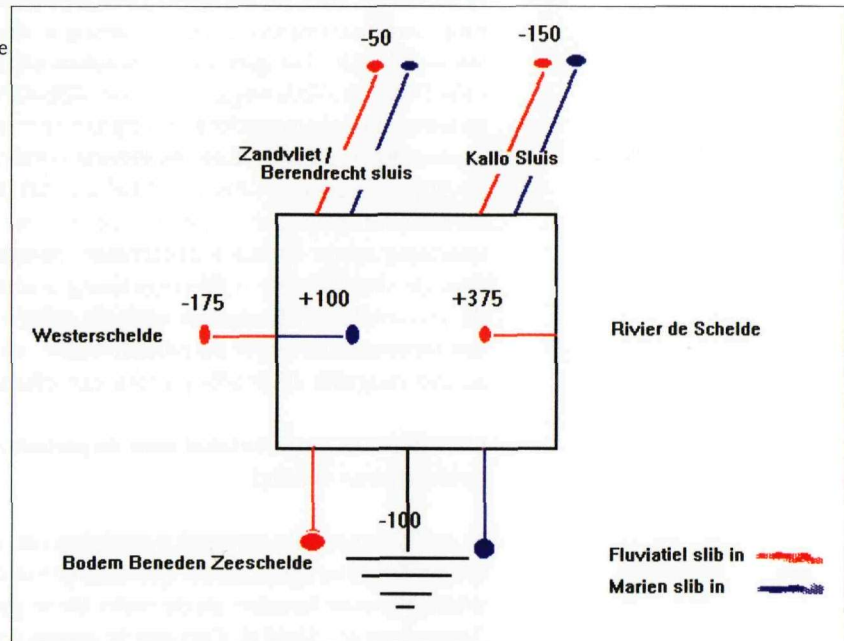
Deze balans is representatief voor de jaren '64-'86. De rivier afvoer is hierin 375 duizend ton, hetgeen een gemiddelde waarde is over de periode '73-'86. Er wordt rekening gehouden met de rol die de bodem speelt in de balans. Metingen van Bastin in '64 en in '86 laten zien dat de slibinhoud van de bodem van de Beneden Zeeschelde in deze periode toegenomen is met ongeveer 2.2 miljoen ton. Dit komt neer op 100 duizend ton per jaar. Dit getal heeft Verlaan in zijn balans verwerkt. Deze toename is gerealiseerd ondanks het feit dat bij de aanleg van de Kallosluizen zeer grote hoeveelheden slib uit de Beneden Zeeschelde zijn verwijderd. Verlaan schat deze post in op 150 duizend ton per jaar in de periode '64-'86.⁸ Vanuit de Zandvlietsluis en de erachter gelegen havens is in de periode '64-'86 eveneens een kleine hoeveelheid slib aan het systeem onttrokken. Verlaan gaat uit van 50 duizend ton per jaar.

.....
⁷ We kunnen ons afvragen of het mogelijk is een balans op te stellen waarin de aanvoer van slib via de Schelde ongewijzigd blijft en die slechts verschilt op het punt van de slibverwijdering. Hiertoe zal de aanvoer van slib via de rivier de Schelde in de slibbalans van na de slibverwijdering geschaald moeten worden naar de waarde van voor de slibverwijdering. Bij deze schaling wordt elke balansterm in de slibbalans van na de slibverwijdering vermenigvuldigd met een factor zodanig dat de aanvoer van slib vanaf de Schelde in beide gevallen gelijk wordt. Deze schaling kan echter alleen gedaan worden wanneer een lineair verband tussen aanvoer en andere balanstermen aangenomen wordt. Over dit verband bestaat geen duidelijkheid waardoor er slechts extra onzekerheden in de balanstermen geïntroduceerd worden.

⁸ Beter is het te zeggen dat de accumulatie in de bodem van de Beneden Zeeschelde 250 duizend ton per jaar heeft bedragen in de periode '64-'86, waarvan 150 duizend ton per jaar weer aan de bodem is onttrokken door infrastructurele maatregelen.

Wanneer we de genoemde getallen in een balans verwerken ontstaat het volgende beeld:

Figuur 4.1: slibbalans van de Beneden Zeeschelde (duizend ton per jaar) over de periode '64-'86 naar [Verlaan et al., 1997a].



Er wordt in bovenstaande balans vanuit gegaan dat al de baggerspecie anorganisch slib is, dit in tegenstelling tot figuur 4.2, waar de gegevens betrekking hebben op de anorganische slibfractie. Uit gegevens van de AMS [Taverniers, 1997], blijkt echter de organische stoffractie bijzonder laag te liggen in de Beneden Zeeschelde, waardoor we geen problemen verwachten bij het vergelijken van figuur 4.1 met figuur 4.2.

Als sluitpost is het grensoverschrijdend transport gebruikt. De verhouding fluviaal/marien in het slib op de grens is gebruikt om onderscheid tussen de twee componenten te maken.

4.3.2. Balans Van Maldegem

Van de balans van Van Maldegem is gezegd dat deze minder geschikt is om als vergelijkingsmateriaal te dienen voor de slibbalans waarin de slibverwijdering is opgenomen vanwege het feit dat de rol die de slibvoorraad in de bodem speelt in deze balans niet verwerkt is. Wanneer deze balanspost alsnog toegevoegd wordt, is het resultaat zeer goed vergelijkbaar met de balans van Verlaan. De balans van Van Maldegem (die zich over de gehele Westerschelde uitstrekt) geeft de mogelijkheid meer in detail in te gaan op de effecten in de Westerschelde zelf.

4.4 Slibbalans van de Beneden Zeeschelde representatief voor de periode '92-'95

Door de Afdeling Maritieme Schelde is vanaf '92 jaarlijks een slibbalans van de Beneden Zeeschelde opgesteld [Claessens, 1993 & 1994; Taverniers, 1995-1997]. Deze activiteit is vanaf '92 als verplichting opgenomen in de WVO-vergunning onderhoudsbaggerwerk. In deze balansen wordt de aanvoer van fluviaal slib vanaf de Schelde bepaald uit debiet - en slibconcentratie metingen. In de balansen is sprake van twee wijzen van slibverwijdering. Allereerst is er verwijdering van slib uit de toegangsgeulen naar de zeesluizen, welke nog onderdeel uitmaken van de Beneden Zeeschelde. De baggeractiviteiten die hiermee gepaard gaan worden in opdracht van de

AMS uitgevoerd. De gegevens zijn dan ook direct van de AMS afkomstig. Voor gebruik in de slibbalans dient het baggervolume (m³) middels vermenigvuldiging met een dichtheid omgerekend te worden naar een baggermassa (ton droge stof). Daarnaast vindt verwijdering van baggerspecie plaats uit de havens zelf, aan de havenzijde van de zeesluizen. Dit gebied valt onder de verantwoordelijkheid van de Gemeente Antwerpen. Voor gegevens omtrent de omvang van de slibverwijdering zijn we op deze instantie aangewezen. In paragraaf 3.3 wordt ingegaan op de wijze waarop deze gegevens bepaald worden. De slibverwijdering zoals omschreven in de WVO-vergunning mag plaatsvinden uit de toegangsgeulen en uit de havendokken.

De uitkomst van de slibbalans is voor een belangrijk deel afhankelijk van de aannamen die in het gebied gedaan worden. Voor het overzicht zijn in tabel 4.3 de posten uit de meest recente slibbalansen nog eens op een rijtje gezet.

Tabel 4.3. Aannamen t.a.v. aan- en afvoer van baggerspecie naar de Beneden Zeeschelde
[in duizend ton per jaar]

Balanspost	Balansen van de Afdeling Maritieme Schelde				
	1992	1993	1994	1995	Gemiddeld
<i>Aanvoer van fluviatiel slib vanaf:</i>					
Rupelmonde	230	202	189	163	196
Zijdelings	20	8	111	10	12
Totaal	250	210	200	173	208
<i>Aanvoer van fluviatiel en marien slib naar:</i>					
Zeesluizen	350	390	268	97	276
Verwijdering	240	550	550	0	335
Totaal	590	940	818	97	611

Opvallend is de veel lagere aanvoer van slib via de rivier de Schelde vergeleken met het gemiddelde over de periode '64-'86. In paragraaf 3.3 wordt hiervoor een aantal redenen gegeven. Als "natuurlijke" waarde voor de slibafvoer uit het Scheldebekken wordt door [Taverniers, 1997] een hoeveelheid van 400 duizend ton droge stof genoemd.

De Afdeling Maritieme Schelde heeft de laatste jaren veel tijd gestopt in het bepalen van de slibaanvoer door de Schelde. Hierdoor is de betrouwbaarheid van balanspost voor de aanvoer van rivier slib steeds beter geworden. Uit tabel 4.3 blijkt dat er door de Schelde steeds minder fluviatiel slib wordt aangevoerd naar het Schelde estuarium. Deze vermindering is grotendeels het gevolg van het verwijderen van slib uit de waterlopen van het Scheldebekken en uit de wachtbekkens. Daarnaast speelt het gebruik van rioolwaterzuiveringsinstallaties in Vlaanderen een rol. Gemiddeld wordt de laatste jaren 200 duizend ton fluviatiel slib aangevoerd naar de Beneden Zeeschelde. De zijdelingse aanvoer van fluviatiel slib bedraagt ca. 12% van de aanvoer via het Rupelbekken en wordt zodoende op 20 duizend ton gesteld. De totale aanvoer van fluviatiel slib bedraagt zodoende 220 duizend ton per jaar. Aangenomen wordt dat 1/3 deel van de aanvoer van fluviatiel slib nauwelijks bezinkbaar is [Van Maldegem, 1993a] en zonder meer getransporteerd wordt richting de Westerschelde. De slibaanvoer naar de Westerschelde bedraagt dus mini-

maal 73 duizend ton per jaar. Hier verschilt de balans met de balans van Verlaan uit paragraaf 4.2. In de balans van Verlaan wordt het slibtransport over de Belgisch-Nederlandse grens als sluitpost gebruikt, terwijl het in deze balans voorgeschreven wordt.⁹

In de periode '92-'95 is door de afdeling Maritieme Schelde slib verwijderd uit de Beneden Zeeschelde. Een groot deel van deze specie is gehaald uit de toegangsgeul van de Kallosluis, om de doorvaart van de schepen in de toegangsgeulen naar de zeesluizen te bevorderen en vanwege de verplichting voortvloeiend uit de WVO vergunning. De specie is grotendeels definitief geborgen in onderwatercellen in de Waaslandhaven. In 1995 heeft i.v.m. een MER procedure geen verwijdering plaatsgevonden. De gemiddelde verwijdering bedraagt ruim 330 duizend ton per jaar over de periode '92-'95. Op grond van gemeten slibpercentages in de toegangsgeul (zie paragraaf 5.1) is aangenomen dat 90% van de specie anorganisch slib <63µm is [Taverniers, 1997].¹⁰ Zodoende kan aangenomen worden dat 300 duizend ton slib per jaar is verwijderd.

Om onderscheid te maken tussen fluviatiel en marien slib gebruiken we de ¹²C/¹³C koolstofisotopenratio in organisch materiaal. Deze methode is niet erg nauwkeurig en ruimtelijke verschillen kunnen groot zijn (zie paragraaf 5.2). De ¹²C/¹³C ratio geeft een getal voor de verhouding tussen de fluviatiele en mariene fracties in het slib waar we ons niet blind op moeten staren. Gegevens zijn echter schaars waardoor de gevoeligheid van de balans voor deze waarde moeilijk te bepalen is.

In [Wartel, 1993] is het percentage fluviatiel slib in de toegangsgeul naar de Kallosluis met de ¹²C/¹³C methode bepaald op 80%, ofwel 240 duizend ton, waarmee vastligt dat 60 duizend ton van mariene oorsprong is. Bij het schutten van de zeesluizen wordt een aanzienlijke hoeveelheid slib naar de havendokken afgevoerd. Vanwege de hoge schut frequentie van de Zandvliet-Berendrecht sluizen en de grootte van deze sluizen [Winterwerp, 1997], is dit transport hier erg groot. Het transport door de zeesluizen wordt bepaald op basis van baggercijfers in de havendokken, zie paragraaf 3.2. Dit gemiddelde hoeveelheid baggerspecie die onttrokken wordt bedraagt ca. 276 duizend ton droge stof per jaar. Op grond van bodemonsters in de toegangsgeulen is aangenomen dat 80% van deze baggerspecie anorganisch slib <63µm is. De onttrekking van slib bedraagt zodoende 221 duizend ton slib per jaar. Ongeveer 2/3 deel (67%) hiervan, of 147 duizend ton is van fluviatiele oorsprong. Hieruit volgt dat 74 duizend ton van mariene oorsprong is. We hebben wederom gebruik gemaakt van de ¹²C/¹³C methode.

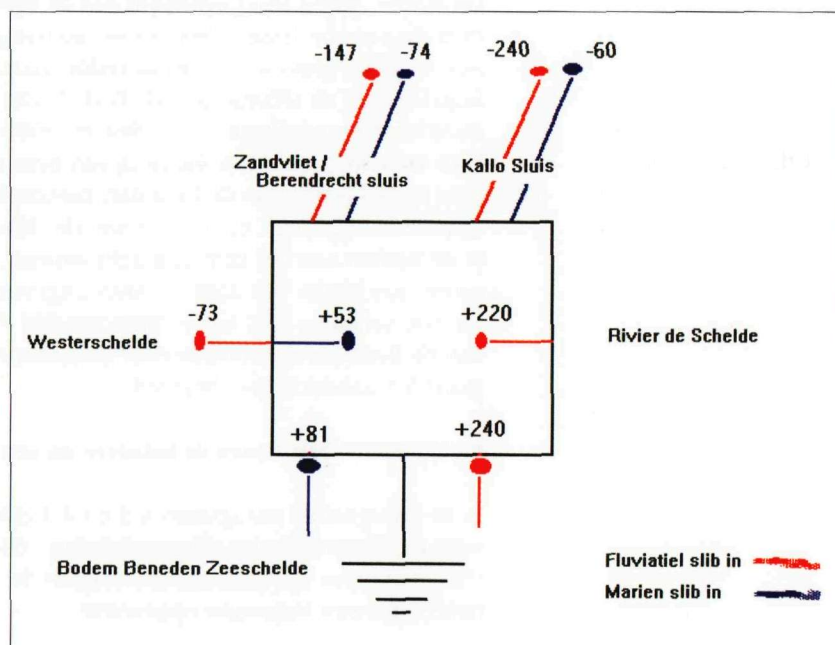
Niet bekend is welke veranderingen in de bodem van de Beneden Zeeschelde plaatsvinden. De veranderingen hierin zijn voorlopig aangenomen als de sluitpost in de slibbalans. In het gebied tussen de Zandvliet- en de Kallosluis, bestaat het slib in de waterbodem gemiddeld voor 70-80% uit fluviatiel materiaal [Verlaan, 1997d]. In het verleden kan dit percentage als gevolg van de hogere aanvoer van fluviatiel slib door de rivier de Schelde hoger hebben gelegen. In de slibbalans van de Beneden

⁹ Uit metingen volgt dat het percentage fluviatiel materiaal in het zwevend stof ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens ca. 60% bedraagt. Dit is een gelij gemiddelde waarde, zodat het redelijk aan te nemen dat het netto transport op de grens voor 60% uit fluviatiel slib bestaat. Wanneer dit gegeven als sluitpost gebruikt wordt in de balans, volgt een transport van fluviatiel slib van Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde van 70 duizend ton op jaarbasis. De aanname dat 1/3 deel van het Schelde slib de Westerschelde bereikt is dus alleszins acceptabel.

¹⁰ Door overvloedverliezen tijdens het baggeren kan het slibpercentage dat op lokatie gemeten wordt iets hoger zijn dan in de baggerspecie die in de beun verdwijnt.

Zeeschelde wordt gegeven in figuur 4.2 hanteren we voorlopig 75% als percentage:¹¹

Figuur 4.2: Slibbalans van de Beneden Zeeschelde (duizend ton per jaar) op basis van slibaanvoer en baggercijfers [Claessens, 1993 & 1994; Taverniers, 1995-1997] en aannames omtrent de verhouding fluviaatelmarien in het slib.



De fluviaatiele balans sluit met een onttrekking uit de waterbodem van 241 duizend ton slib. Uit de verhouding fluviaatelmarien in de bodem volgt dan dat 80 duizend ton marien slib moet zijn onttrokken aan de bodem. Om de mariene balans sluitend te krijgen moet vanuit de Westerschelde 53 duizend ton marien slib zijn aangevoerd naar de Beneden Zeeschelde. Deze waarde lijkt wat aan de lage kant vergeleken met de waarde die in paragraaf 4.3 voor de periode '64-'86 is gehanteerd. Bij het vaststellen van de definitieve balans in hoofdstuk 6 komen we op dit punt nog terug. Uit deze resultaten volgt dat het percentage fluviaat materiaal in zwevend slib ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens ca. 60% is. Dit is de verhouding die bereikt zou worden bij evenwicht. Deze waarde klopt redelijk wat door [Verlaan, 1997c] bij een gemiddeld rivierdebiet gegeven wordt. Volgens deze slibbalans wordt er momenteel dus jaarlijks 321 duizend ton slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde onttrokken.

Volgens [Bastin, 1993] bevatte de bodem van de Beneden Zeeschelde in 1986 ca. 7 miljoen ton slib. De jaarlijkse aangroei van de waterbodem bedroeg in de periode 1964-1986 ca. 0.1 miljoen ton. De aanvoer van fluviaat slib bedroeg in die periode 0.4 miljoen ton per jaar. Momenteel bedraagt deze aanvoer ca. 0.2 miljoen ton per jaar. In de periode 1986 tot heden is gemiddeld 0.3 miljoen ton fluviaat slib per jaar is aangevoerd, 0.1 miljoen ton minder dan vóór 1986. We gaan er daarom even vanuit dat er na 1986 geen aangroei van slib in de waterbodem heeft plaatsgevonden. In 1992 bedroeg de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde nog steeds ca. 7 miljoen ton. In de periode '92-'95 is volgens figuur 4.2 ruim 1 miljoen ton slib onttrokken aan de bodem van de Beneden Zee-

¹¹ Teneinde deze balans op te kunnen stellen, moet een extra aanname gedaan worden vergeleken met de balans uit figuur 4.1 wat betreft de verhouding tussen het slib van fluviaatiele en mariene afkomst. De reden hiervoor is dat de ontwikkeling van de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde in de huidige balans onbekend is, terwijl deze in de balans uit figuur 4.1 bekend verondersteld werd.

schelde. De huidige voorraad slib bedraagt dus naar schatting een kleine 6 miljoen ton. Dit betekent een afname van ruim 15% in de periode '92-'95.

Uit [Otter, 1996] blijkt eveneens dat de veranderingen in de waterbodem over de periode 1986-1993 binnen de marge van de meetnauwkeurigheid zijn. In grote lijnen is in 1993 dezelfde massa aan slib aanwezig als in 1986. Bepaling van de slibmassa in de bodem van de Beneden Zeeschelde op dezelfde wijze als Bastin al in 1964 en 1986 heeft gedaan zou meer zekerheid kunnen geven over omvang van deze balanstern. Door de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde van nu te vergelijken met de situatie in 1986, kan de invloed van de slibverwijdering op de slibvoorraad in de bodem aan het licht gebracht worden. Een "herhaling Bastin" zal echter pas medio '98 door de AMS uitgevoerd worden. Tot die tijd moeten we ons behelpen met het verloop van het slibpercentage in de drempels van de Beneden Zeeschelde over de periode '88-'95. Hier wordt in paragraaf 5.1 aandacht aan besteed.

4.5 De verschillen tussen de balansen op een rijtje

In de voorgaande paragrafen 4.3 en 4.4 zijn de slibbalansen behandeld voor de situatie zonder slibverwijdering ('64-'86) en met slibverwijdering ('92-'96). Voor de duidelijkheid worden de voornaamste verschillen tussen beide balansen nogmaals opgesomd:

- Vanwege de aanleg van nieuwe toegangsgeulen naar havendokken in de Beneden Zeeschelde (Kallo) en de verdieping van bestaande geulen (Zandvliet), is de sedimentatie in de havengebieden sterk toegenomen.
- De aanvoer van slib vanaf de Schelde is sterk gedaald door de aanleg van rioolzuiveringsinstallaties, het gebruik van wachtbekkens voor het rivierwater en natuurlijke fluctuaties in rivierdebiet.
- Er heeft een sterke ontslibbing van de bodem van de Beneden Zeeschelde plaatsgevonden. De omstandigheden voor sedimentatie zijn in de toegangsgeulen tot de zeesluizen optimaal waardoor in andere delen van de bodem netto erosie van slib heeft plaatsgehad. Het slib dat uit de bodem erodeert, is ouder naar mate het uit diepere delen van de bodem afkomstig is. Dit kan de kwaliteit van het watersysteem in de omgeving nadelig beïnvloeden.
- Het transport van fluviatiel slib vanuit de Beneden Zeeschelde is afgenomen. Voor het grootste deel wordt deze afname echter veroorzaakt door de afname van de aanvoer van slib via de Schelde. Daarnaast speelt de slibverwijdering een rol.
- Het transport van marien slib vanuit de Westerschelde naar de Beneden Zeeschelde is in beide balansen de sluitpost. De afname van dit transport die in de balans over de periode '92-'96 te zien is, heeft geen fysische verklaring, maar het gevolg van de methodiek. Als gevolg van verdiepingswerkzaamheden in de Westerschelde is eerder een toename dan een afname van het transport te verwachten.

4.6 Enkele balansternen nader beschouwd

4.6.1 Uitwisseling van slib tussen de bodem en de waterfase in de Beneden Zeeschelde: de effecten van de slibverwijdering

Er kan verwarring ontstaan zijn over de rol die het slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde speelt voor de waterkwaliteit voor- en nadat slibverwijdering in het Antwerps havengebied plaats heeft gevonden. De reden hiervoor is dat er eigenlijk twee zaken door elkaar lopen: de aanwezigheid van de toegangsgeulen naar de zeesluizen en de slibverwijdering.

Daarnaast is de vervuilingsgraad van het slib op verschillende dieptes in de bodem van belang. Om de relatie tussen de bodemvoorraad, de slibverwijdering en de waterkwaliteit wat te verhelderen wordt hieronder een drietal situaties onderscheiden.

1. De Beneden Zeeschelde zonder havendokken en toegangsgeulen: de situatie grofweg in de jaren '60.
2. De Beneden Zeeschelde met havendokken en toegangsgeulen (Kallo en Zandvliet/Berendrecht); bij het baggeren wordt al de specie terug in het systeem gebracht: de situatie aan het eind van de jaren '80.
3. De situatie zoals die voor het midden van de jaren '90 geldt: de bagger-specie uit de havendokken en toegangsgeulen wordt (grotendeels) uit het systeem verwijderd.

Per variant wordt stil gestaan bij hoe deze de slibvoorraad van de bodem beïnvloed. Ook zal ingegaan worden op de vraag of de slibverwijdering geleid kan hebben tot een toename van het transport van contaminanten via het transport van oud afgezet bodemslib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde. De dynamiek van de bodem zorgt voor uitwisseling van slib tussen de bodem en het water. Onder bruto erosie verstaan we het afstaan van slib door de bodem aan het water. Bruto sedimentatie is het omgekeerde mechanisme. De tijdschaal waarop dit plaatsvindt varieert van een getijperiode tot de morfologische schaal waarop geulen migreren. Het verschil tussen beide bruto grootheden bepaald of er netto erosie of sedimentatie zal plaatsvinden.

1. Vanaf de rivier de Schelde en vanuit zee werd slib toegevoerd naar de Beneden Zeeschelde. Er was een netto transport van marien slib vanuit de Westerschelde en ook een deel van het slib dat door de rivier werd aangevoerd, sedimenteerde in de Beneden Zeeschelde. De fijnste fractie fluviatiel materiaal verdween met het rivierwater richting Westerschelde. Er was een netto accumulatie van slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde (hieronder vallen ook de schorren en overige intergetijdegebieden in de Beneden Zeeschelde zelf). Deze netto accumulatie werd veroorzaakt doordat er per saldo minder slib uit de bodem geërodeerd werd (door omwoeling) dan er sedimenteerde. Ook in deze periode vond er erosie van eerder afgezet slib uit de bodem plaats. De bruto sedimentatie overtrof deze erosie echter. Uit de slibbalans in [Verlaan, 1997a] volgt dat in de periode '64-'86 slib accumulatie in de bodem heeft plaatsgevonden. Deze netto sedimentatie zorgde ervoor dat het slib in de boven laag van de bodem relatief nieuw en schoon was. Uitwisseling van slib tussen bodem en waterfase vond voornamelijk uit deze bovenste laag plaats. Het oudere slib werd op deze wijze steeds meer afgedekt. Hoewel in deze periode de Zandvlietluis en de Berendrecht-luis aangelegd zijn, nemen we aan dat de omvang van de accumulatie die voor deze periode is berekend representatief beschouwd mag worden voor de jaren '60.
2. In 1988 is de Kallosluis in gebruik genomen. Al tijdens de aanleg bleek dat de toegangsgeul naar deze sluis veel slib ving als gevolg van de lage stroomsnelheden in de geul. De Zandvliet en Berendrecht sluizen waren inmiddels geruime tijd in gebruik. Op hydrodynamisch vlak is er buiten de directe omgeving van de sluizen en afgezien van een verdieping van de vaargeul in de Beneden Zeeschelde niets veranderd. De diepere stroomgeul kan - vanwege de afgenomen stroomsnelheden - de bruto sedimentatie iets hebben doen toe nemen. Omdat dit punt niet essentieel is in het betoog laten we het (mogelijk) effect voorlopig buiten

beschouwing en gaan we uit van een ongewijzigde hydrodynamica. Vanwege dit gegeven mogen we veronderstellen dat de bruto erosie van slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde niet beïnvloed wordt door de aanwezigheid van de havenwerken. Wat wel wijzigt is de lokatie waar (bruto) sedimentatie plaatsvindt. Vanwege de lage stroomsnelheden in de diepe toegangsgeulen zal een deel van de sedimentatie die voorheen op de bodem van de Beneden Zeeschelde en op de schorren langs de oevers plaatsvond, nu in de toegangsgeulen plaatsvinden. Door de toegenomen omvang van het sedimentatie gebied, is het zelfs niet uit te sluiten dat de bruto sedimentatie toegenomen is en daarmee ook de accumulatie van slib in de gehele Beneden Zeeschelde. Dit is evenmin essentieel in het betoog en waarschijnlijk maar van korte duur. Door baggerwerken wordt namelijk een extra (kunstmatige) erosie geïntroduceerd slib dat sedimenteert in de havens en geulen wordt op geregelde tijden weer terug in de vaargeul geschoven zodat het netto effect in deze gebieden nul is. Nadat het slib vanuit de havens en geulen weer in de rivier geschoven is kan net als voorheen sedimentatie in de "natuurlijke gebieden" plaatsvinden. De havens en geulen vormen dus maar een tijdelijke onderbreking van de erosie-sedimentatie cyclus. Op de langere termijn is het daarom aanneemelijk te veronderstellen dat ook de bruto sedimentatie niet of nauwelijks door de aanwezigheid van de havens en geulen wordt beïnvloed. De bruto erosie zal kleiner blijven dan de bruto sedimentatie en netto treedt accumulatie van slib in de Beneden Zeeschelde op. Ook in deze situatie zal er door de dynamiek van de bodem slib uit eerder afgezette lagen in de bodem van de Beneden Zeeschelde geërodeerd worden en gedeeltelijk richting Westerschelde getransporteerd worden. Dit is ook in deze situatie relatief jong materiaal uit de bovenste bodemlaag.

Concluderend: de havendokken en toegangsgeulen zijn een tijdelijke tussen stop voor het slib dat vanaf de Schelde richting Westerschelde wordt getransporteerd maar hebben op korte termijn geen effect op het netto transport over de Belgisch-Nederlandse grens. Hoewel er uitwisseling van slib tussen de bodem en de waterfase plaatsvindt, is het aandeel "oud" slib hierin gering. Er is evenmin te verwachten dat de havenwerken de erosie van oud slib uit de bodem zullen stimuleren.

3. Vanaf het begin van de jaren '90 is structureel baggerspecie uit de toegangsgeul naar de Kallosluis verwijderd. Het gaat hierbij om zeer grote hoeveelheden (± 2.5 miljoen ton droge stof tot op heden). Verwijdering van baggerspecie uit de toegangsgeul betekent onttrekking van slib uit de bodem. Baggerspecie dat voorheen terug in de hoofdgeul werd geschoven, wordt nu uit het systeem verwijderd. Slib dat nu in de geul terecht komt krijgt nu geen tweede kans om op een "natuurlijke" sedimentatie lokatie te bezinken. Een deel van het slib dat van nature in de bodem sedimenteerde, komt in de toegangsgeul terecht en wordt op land geborgen. Hiermee neemt de bruto sedimentatie in de Beneden Zeeschelde af. De bruto erosie verandert echter niet door deze maatregel. De processen die verantwoordelijk zijn voor erosie van slib uit de bodem zijn onafhankelijk van wat er met het slib in de toegangsgeul gebeurt. Voor de bruto erosie is het niet van belang of de baggerspecie terug in het systeem geschoven wordt - zoals in variant 2 - of dat er specie op land geborgen wordt. Verwijdering van slib uit de toegangsgeul betekent onttrekking van slib uit de bodem en van de schorren ¹²

¹² De bruto erosie van slib uit de bodem zal zelfs afnemen op het moment dat de slibverwijdering uit de toegangsgeul bij de Kallosluis de slibvoorraad in de bodem doet afnemen.

Wat wel verandert is de leeftijd van het slib dat uit de bodem erodeert. Naar mate er meer slib uit de bodem onttrokken wordt, zullen steeds oudere slibvoorraden aan het bodem oppervlak komen en in suspensie geraken. Ontslibbing van de bodemvoorraad draagt op deze wijze bij aan het vrijkomen van relatief vuil sediment.¹³

Concluderend: de slibverwijdering uit de toegangsgeul naar de Kallosluis leidt niet tot een toename van de bruto erosie slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde. Doordat veel slib in de toegangsgeul sedimenteert en van hieruit wordt verwijderd, neemt de bruto sedimentatie van slib in andere delen van de bodem echter af. Netto vindt er erosie plaats en verdwijnt er slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde naar land. Na verloop van tijd komt een groter aandeel "oud" slib aan het oppervlak met een hogere vervuilingsgraad. Een deel van dit slib sedimenteert echter weer in de toegangsgeulen en wordt uit het systeem verwijderd. De verwijderingsmaatregel leidt op deze wijze tot een sanering van de bodem in de Beneden Zeeschelde. Een ander gedeelte kan echter naar de Westerschelde getransporteerd worden, waardoor de waterkwaliteit (tijdelijk) negatief beïnvloed wordt.

4.6.2 De gevolgen voor de troebelheid in de Westerschelde

De Westerschelde is een systeem dat slib importeert. De slibimport in de midden van de jaren '80 mag min of meer in balans verondersteld worden met de export en de sedimentatie (de concentratie blijft ongeveer gelijk). Bij een afname van de aanvoer van slib vanuit de Beneden Zeeschelde (fluviaal slib) kan de concentratie en de sedimentatie beïnvloed worden. De slibconcentratie wordt bepaald door de hoeveelheid slib die kan resuspenden vanaf de bodem. Normaliter betreft dit het bovenste laagje van de bodem. De dikte van dit laagje in een bepaald gebied is de resultante van de aanvoer en afvoer van slib.

Stel nu eens voor dat de bodem van de Westerschelde van beton is, met daarop dat dunne laagje slib. Er wordt alleen slib naar de Westerschelde aangevoerd vanuit de Beneden Zeeschelde en niet vanaf zee. De aanvoer van slib is gelijk aan de afvoer naar de Noordzee: een evenwichtssituatie. Wanneer nu de aanvoer van slib vanaf de Beneden Zeeschelde afneemt, zal de afvoer naar de Noordzee nog even op het oude peil blijven, waardoor de dikte van het laagje slib op de bodem af zal nemen. Omdat de dikte van dit laagje slib de slibconcentratie bepaalt, neemt deze evenredig af. Na verloop van tijd zal ook de afvoer naar de Noordzee verminderen net zolang totdat er een nieuw evenwicht bereikt is tussen aanvoer en afvoer van slib, met een dunner laagje slib op de bodem.

In werkelijkheid is de bodem van de Westerschelde niet van beton, maar bestaat deze uit zand vermengd met een klein percentage slib. De voorraad slib in de bodem is echter groot en mobiel (zie paragraaf 4.4). Daarnaast is de Schelde niet de enige bron van slib, maar levert de Noordzee ook slib aan. Dit laatste doet echter niks af van de redenering. Voor de jaren '80 mag er echter wel een evenwicht verondersteld worden tussen de aanvoer van slib en de sedimentatie op slikken en schorren. Wanneer nu de aanvoer van slib naar de Westerschelde afneemt als gevolg van de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde, zal de afname van de dikte van het sliblaagje dat de slibconcentratie bepaalt lange tijd gecompenseerd kunnen worden door erosie van slib uit de bodemvoorraad. En afname van de slibconcentratie zal daarom niet onmiddellijk volgen op een verminderde aanvoer van slib.

¹³ Het is niet bekend of een slibarme bodem hetzelfde erosie gedrag zal vertonen als de huidige bodem.

De slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde door AMS over de jaren '92-'96 bedraagt ruim 2 miljoen ton droge stof en is significant ten opzichte van de bodemvoorraad (6-7 miljoen ton droge stof). De verwachting is dan ook dat de slibconcentratie in de Beneden Zeeschelde momenteel merkbaar lager moet zijn dan pakweg 10 jaar geleden. Op de Belgisch-Nederlandse grens is de concentratie afname minder groot. Een groot deel van het door de Schelde aangevoerde slib bleef voordat slibverwijdering plaats had toch al achter in de Beneden Zeeschelde. Alleen het fijner slib werd naar de Westerschelde afgevoerd. Deze fijne slibfractie wordt niet erg beïnvloed door de slibverwijdering, waardoor de afname in slibconcentratie in de Westerschelde naar alle waarschijnlijkheid zeer beperkt zal zijn, bovendien zal de aanvoer van zeeslib versluierend werken. In hoofdstuk 5 komen we hier aan de hand van meetresultaten nog op terug.

4.7 Onzekerheden in de balans termen

In de loop van het verhaal mag duidelijk zijn geworden dat niet alle balans-termen met even grote nauwkeurigheid bekend zijn. Onzekerheden zijn aanwezig omtrent de grootte van een aantal balansposten maar ook over de verhouding tussen de fluviatiele en mariene fractie in het slib. Factoren die genoemd kunnen worden zijn de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde, de aan- en afvoer van slib over de Belgisch-Nederlandse grens, de uitwisseling van slib door de Zandvliet en Berendrecht sluizen en de samenstelling van het slib uit de bodem en in de havenbekkens. De vraag is hoe onzekerheden in deze posten doorwerken in de balans. Door een aantal balans termen te variëren proberen we hier wat inzicht in te krijgen.

Allereerst stellen we de balansvergelijkingen voor het fluviatiele en het mariene slib op:

$$F + F_B - F_Z - F_K - F_G = 0$$

$$M_B - M_Z - M_K - M_G = 0$$

F en M staan respectievelijk voor fluviatiel en marien slib. De F zonder subscript geeft de aanvoer van fluviatiel slib vanaf de Schelde weer. De subscripts B, Z, K, G staan voor bodem, Zandvliet/Berendrecht sluis, Kallosluis en grens. De balans wordt in figuur 4.2 aanschouwelijk gemaakt.

De aanvoer van slib via de Schelde F is goed bekend. Dit geldt eveneens voor de slibverwijdering bij Kallo $F_K + M_K$ en de verhouding tussen het fluviatiele en mariene aandeel F_K/M_K (80%/20%). In de omgeving van de Zandvliet en Berendrecht sluizen wordt de verhouding F_Z/M_Z in [Van Maldegem, 1997] op 67%/33% gesteld. In de bodem van de Beneden Zeeschelde stelt Van Maldegem de verhouding F_B/M_B op 75%/25%. Deze verhoudingen zullen we variëren. De posten F_B respectievelijk M_G dienen als sluitpost van de fluviatiele en mariene balans en zullen vanzelf uit de balans moeten komen rollen. De resterende balansposten $F_Z + M_Z$ en F_G variëren we eveneens.

Uit de variatie analyse is gebleken dat een verhouding F_B/M_B van 50%/50% i.p.v. 75%/25% tot onrealistische resultaten leidt. Variatie van deze verhouding laten we daarom verder achterwege. In de onderstaande tabellen worden achtereenvolgens de balans volgens Van Maldegem en twee extreme gevolgen van variatie van de termen $F_Z + M_Z$ en F_G gegeven.

Tabel 4.5: balanst termen volgens de aanpak van Van Maldegem (zie paragraaf 4.4).

Fluviatiel	Aanvoer vanaf de Schelde	220	Marien	Aanvoer vanaf de Schelde	220
	Afvoer Zandvliet	147		Afvoer Zandvliet	74
	Verwijdering Kallo	24		Verwijdering Kallo	60
	Onttrekking bodem	241		Onttrekking bodem	80
	Export grens	73		Import grens	53
	Onttrekking bodem totaal	321			
	Afvoer Zandvliet totaal	221			
	Afvoer Kallo totaal	330			

Tabel 4.6: balanst termen bij maximaal transport door de Zandvliet en Berendrecht sluizen en maximale doorvoer van fluviatiel slib naar Westerschelde (zie paragraaf 3.2).

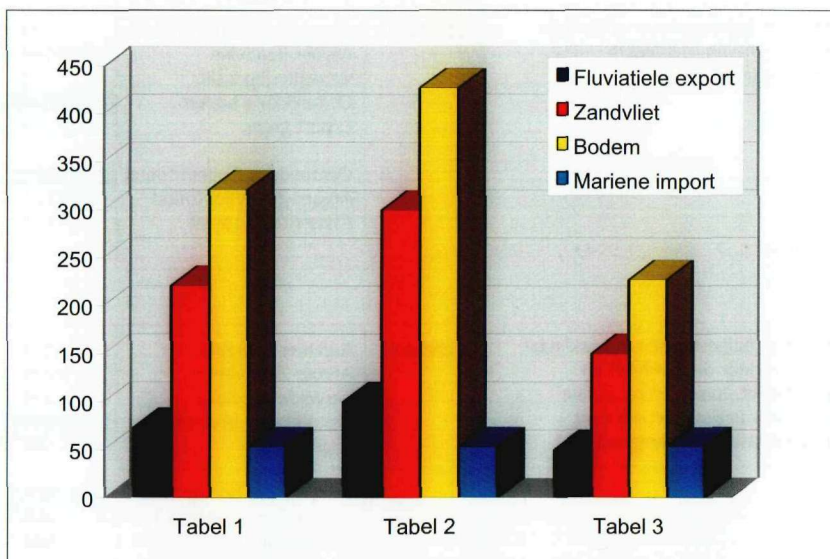
Fluviatiel	Aanvoer fluviatiel	220	Marien	Aanvoer fluviatiel	220
	Afvoer Zandvliet	200		Afvoer Zandvliet	100
	Verwijdering Kallo	240		Verwijdering Kallo	60
	Onttrekking bodem	320		Onttrekking bodem	107
	Export grens	100		Import grens	53
	Onttrekking bodem totaal	427			
	Afvoer Zandvliet totaal	300			
	Afvoer Kallo totaal	300			

Tabel 4.7: balanst termen bij minimaal transport door de Zandvliet en Berendrecht sluizen en minimale doorvoer van fluviatiel slib naar de Westerschelde (zie paragraaf 3.2).

Fluviatiel	Aanvoer vanaf de Schelde	220	Marien	Aanvoer vanaf de Schelde	220
	Afvoer Zandvliet	100		Afvoer Zandvliet	50
	Verwijdering Kallo	240		Verwijdering Kallo	60
	Onttrekking bodem	170		Onttrekking bodem	57
	Export grens	50		Import grens	53
	Onttrekking bodem totaal	227			
	Afvoer Zandvliet totaal	150			
	Afvoer Kallo totaal	300			

In tabellen 4.5, 4.6 en 4.7 wordt met een wit vakje een constante term aangeduid, met een licht gearceerd vakje een handmatig gevarieerde term en met een donker gearceerd vakje een sluitpost. Uit de tabellen volgt duidelijk dat variatie in de balansposten $F_Z + M_Z$ (transport door zeesluizen) en F_G (transport van fluviatiel slib naar de Westerschelde) praktisch direct doorwerkt in de grootte van de onttrekking van slib uit de bodem. Er lijkt een soort kortsluitstroom te zijn ontstaan tussen de bodem en de havendokken gelegen achter de Zandvliet en Berendrecht sluizen. De import van marien slib vanuit de Westerschelde wordt in veel mindere mate door de variatie beïnvloed. De oorzaak hiervan is dat de verhouding fluviatiel/marien in het bodemslib vergelijkbaar is met het havenslib. Er wordt voldoende marien slib in de juiste verhouding uit de bodem geërodeerd om de "honger" van de havendokken te stillen. Een en ander is nog eens geïllustreerd in figuur 4.3.

Figuur 4.3: Effect van variatie van het transport door Zandvliet en Berendrecht sluis en export van fluviatiel slib op de sluitposten bodemonttrekking en import van marien slib.



De resultaten blijken sterk beïnvloed te worden door de verhouding tussen de fluviatiele en de mariene fractie. Om dit te illustreren geven we als laatste rekenvoorbeeld de situatie waarin de verhouding F_z/M_z in de havendokken bij de Zandvliet en Berendrecht sluizen niet 67%/33% is maar 50%/50%. Deze verhouding is zo gek nog niet gezien het percentage marien slib van 30-65% dat in [Verlaan et al., 1997a] voor het zwevend materiaal op de grens genoemd wordt. Er is zo een duidelijk andere verhouding tussen de twee slibfractie in de havendokken dan er gemiddeld in de bodem van de Beneden Zeeschelde te vinden is. Als gevolg hiervan komt er door bodemerosie niet voldoende marien slib vrij om de havendokken in hun behoefte te voorzien. De verhouding 50%/50% tussen de beide slibfracties kan in de havendokken alleen bereikt worden wanneer vanuit de Westerschelde extra marien slib wordt aangeleverd. De andere gegevens zijn vergelijkbaar met tabel 4.5.

Tabel 4.8: Verhouding F_z/M_z bij de Zandvliet en Berendrecht sluizen niet 1/1 i.p.v. de 2/1 uit tabel 4.5.

Fluviatiel	Aanvoer fluviatiel	220	Marien	Afvoer Zandvliet	111
	Afvoer Zandvliet	111		Verwijdering Kallo	60
	Verwijdering Kallo	240		Onttrekking bodem	68
	Onttrekking bodem	204		Import grens	103
	Export grens	73			
	Onttrekking bodem totaal	272			
	Afvoer Zandvliet totaal	221			
	Afvoer Kallo totaal	300			

De verhouding tussen de beide slibfracties op de grens die uit tabel 4.8 volgt, is wat scheef maar niet onrealistisch voor een lage rivierafvoer. Grote veranderingen in de aannames kunnen toch tot een acceptabel resultaat leiden. Goede gegevens omtrent de ruimtelijke verdeling van de verhouding tussen de fluviatiele en mariene fractie in de Beneden Zeeschelde blijken dus essentieel om tot een goede balans te komen. Hoe groter de ruimtelijke variatie in deze verhouding is, des te groter de impact van een verandering in een balanspost op de totale balans is. Wanneer de variaties in de balanst termen zoals uitgevoerd in de tabellen 4.5, 4.6 en 4.7 gecombineerd toegepast worden, kunnen nog extremere uitkomsten berekend worden.

5. Wat kunnen we opmaken uit bestaande veldgegevens

Om de fysische en chemische toestand in het Schelde estuarium te bepalen, worden er sinds jaren frequent metingen uitgevoerd. Het betreft onder andere metingen naar concentraties en gehalten van verschillende contaminanten en nutriënten in water en sediment, troebelheidsmetingen, bepaling van de korrelgrootte verdeling in het zwevend stof en sediment en de verhouding tussen de hoeveelheid slib die door de Schelde en vanaf de Noordzee wordt aangevoerd. Deze datasets bevatten een schat aan informatie waarmee de slibbalans die opgesteld is in hoofdstuk 4 gevalideerd kan worden. Per paragraaf wordt stil gestaan bij een dataset en wordt de betekenis van de gegevens vermeld voor de slibbalans voor de periode waarin de slibverwijdering plaats vindt.

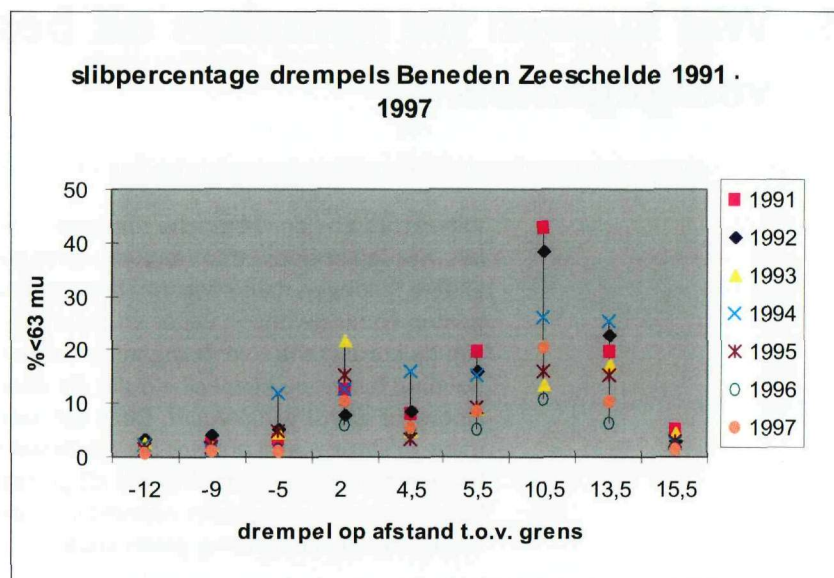
5.1 Het slibpercentage van de drempels in de Beneden Zeeschelde en Westerschelde in de periode '91-'97, een indicatie van de slibinhoud van de Beneden Zeeschelde

Het slibpercentage op de drempels in de Beneden Zeeschelde en Westerschelde is ontleend aan de analyseresultaten van de jaarlijkse bemonsteringscampagne uitgevoerd door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) in de periode 1990-1997. Deze campagne bestrijkt het gebied tussen de Sluische Hompels (ter hoogte van Cadzand) en de drempel van Krankeloon (nabij Antwerpen). Tijdens deze bemonsteringstochten zijn ook de toegangseulen tot de zeesluizen bemonsterd.

Op de drempels komen eb- en vloed-gedomineerde geulen samen, waardoor er ten gevolge van de residuele sedimenttransporten extra sedimentatie plaatsvindt. Hierdoor ontstaan ondiepten tussen opvolgende bochten in de rivier. Deze sedimentatie gebieden zijn qua oppervlakte veelal kleiner dan 1 km². Het slibpercentage ter plaatse is derhalve hooguit een eerste indicatie voor het gehele estuarium. Het slibpercentage in de drempels is over het algemeen laag en bedraagt gemiddeld 10-15%. De drempels worden zeer regelmatig gebaggerd. Aangenomen wordt dat het sediment uit de directe omgeving komt. Het slibpercentage op de drempels wordt daarmee beïnvloed door het slibpercentage van de waterbodem gelegen binnen een getij-weglengthe van de drempel.

Uit de monsters van de drempels zijn kalk en humus verwijderd, voordat de korrelgrootte-verdeling is bepaald. De slibfracties <63µm, <16µm en <2µm zijn gegeven ten opzichte het totaal aan minerale delen.

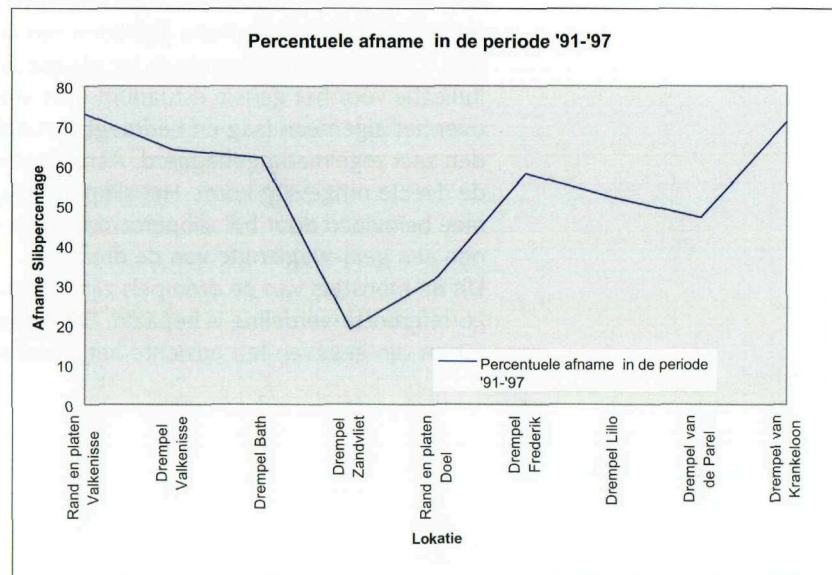
Figuur 5.1: Het verloop van het slibpercentage van de drempels in de Beneden Zeeschelde in de periode '91-'97.



In figuur 5.1 is het jaarlijkse slibpercentage van de drempels met een korrelgrootte kleiner dan $63\mu\text{m}$ uitgezet op een kilometreringsas langs het estuarium. Kilometer 0 is hierbij de Belgisch Nederlandse grens. Het kilometreringpunt voor elke drempel is vermeld in tabel 5.1. Het algemene beeld is dat het slibpercentage in de periode 1991-1997 sterk is vermindert.

Uit de figuur blijkt ook dat het slibpercentage per jaar nogal varieert. Het algemene beeld is echter dat er een duidelijke afname van het slibpercentage van de drempels is opgetreden. In figuur 5.2 is per drempel in gebied tussen Valkenisse en Krankeloon aangegeven wat de verandering in de periode 1991-1997 is.

Figuur 5.2: De verandering van het slibpercentage in de drempels op het traject Valkenisse Krankeloon in de periode 1991-1997.

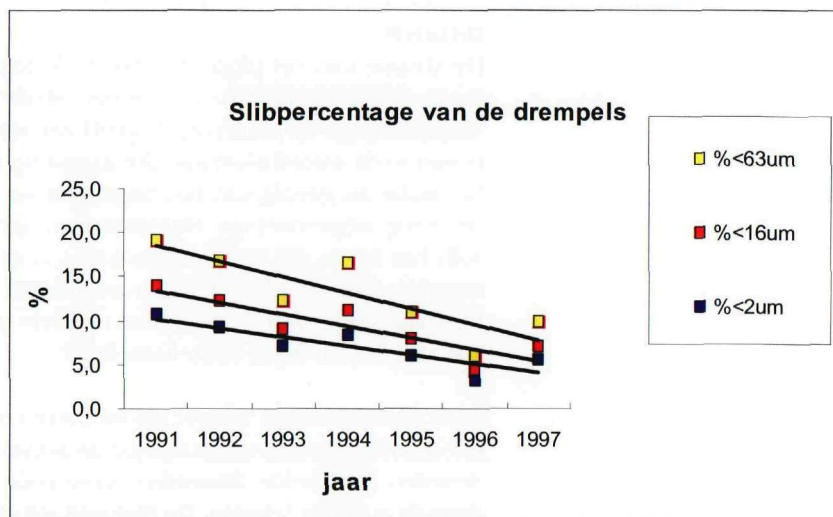


De slibfractie $<63\mu\text{m}$ gemiddeld over alle drempels neemt af van 13% in 1991 naar 7% in 1997. De afname bedraagt gemiddeld 53% (met standaarddeviatie (=18%). De afname is trendmatig, dat wil zeggen voor alle

drempels. Niet elk jaar laat dezelfde afname zien. Er zijn zelfs jaren bij waarin het slibpercentage enigszins toeneemt. Ruimtelijk gezien is de afname van de drempels van Valkenisse tot Krankeloon van dezelfde orde van grootte.

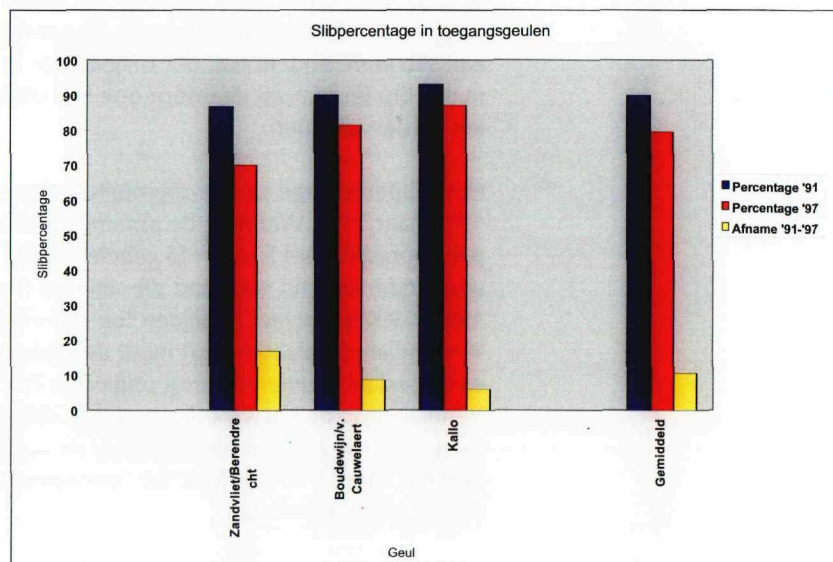
Globaal is nagegaan of deze verandering ook geldt voor de slibfracties <16µm en <2µm. Uit figuur 5.3 valt op te maken dat ook voor deze fracties de afname van het percentage rond de 50% ligt.

Figuur 5.3: Ontwikkeling van het slibpercentage van de drempels in de Beneden Zeeschelde, gemiddeld over alle drempels.



De ontwikkeling van het slibpercentage van de drempels is vergeleken met de ontwikkeling van het slibpercentage van de toegangsgeulen tot de zee-sluizen in de Beneden Zeeschelde. Dit zijn de toegangsgeulen naar de Zandvliet en Berendrecht, de Boudewijn en Van Cauwelaertsluis en de Kallosluis. In deze toegangsgeulen wordt veel slib ingevangen, als gevolg van de sterk gereduceerde stroomsnelheid door de ligging in de luwte van de hoofdgeul. De verandering van de slibpercentages in de toegangsgeulen is gegeven in figuur 5.4.

Figuur 5.4: De verandering van het percentage van de slibfractie <63 µm per toegangsgeul.



De slibpercentages in de toegangsgeulen is in de periode 1991-1997 met gemiddeld 10,5% afgenomen. Deze afname is relatief gering, maar wel

trendmatig. Deze trend is het meest regelmatig in de toegangsgeul tot de Kallosluis. Een vergelijkbare afname geldt ook voor de fracties $<16\mu\text{m}$ en $<2\mu\text{m}$.

Het gemiddelde slibpercentage in de toegangsgeulen is veel hoger dan dat van de drempels (ca. 85% tegenover 10%). De afname van het slibpercentage in de toegangsgeulen ligt in absolute zin daarom hoger dan op de drempels. Relatief gezien treedt er op de drempels een veel sterkere vermindering van het slibpercentage op.

Discussie

De afname van het slibpercentage in de toegangsgeulen is relatief gering ten opzichte van de afname van het slibpercentage van de drempels. Het slibpercentage op de drempels geeft een weerspiegeling van hetgeen er boven in de waterkolom aan slib aanwezig is. Een hoge slibconcentratie in het water als gevolg van een hoge aanvoer via de Schelde geeft een relatief hoog slibpercentage. Het slibpercentage in de toegangsgeulen (waar zelfs het fijnste slib kan sedimenteren), is een redelijke afspiegeling van de korrelgrootte verdeling in het zwevend stof. Een hoog slibpercentage in de toegangsgeulen betekent dat het mobiele sediment in de Beneden Zeeschelde een hoog slibgehalte heeft.

Voor 1990 werd het slib dat via de sluizen de havencomplexen bereikte en het slib uit de toegangsgeulen tot de zeesluizen, teruggestort in de Beneden Zeeschelde. Bovendien werd vóór 1990 veel meer slib aangevoerd door de rivier de Schelde. De hoeveelheid slib in suspensie lag hoger, waarmee te verklaren is dat het slibpercentage van de drempels veel hoger lag dan nu het geval is. Het feit dat de drempels gemakkelijker slib verliezen dan de toegangsgeulen is te verklaren door de forse getijsnelheden op de rivier. In de toegangsgeulen zijn de stroomsnelheden buiten de neren erg klein waardoor geresuspendeerd slib van de drempels er gemakkelijk kan sedimenteren. De aanslibbing van de toegangsgeulen is een continu proces, in die zin dat het elke getijcyclus optreedt. De aanwezigheid van toegangsgeulen of luwtegebieden in een rivier betekent feitelijk dat er een transport op gang gebracht wordt van de drempels en de rivierbedding naar de toegangsgeulen. Verwijdering van dit slib uit de toegangsgeulen betekent dat dit transport voortgezet wordt naar land. De sterke aanslibbing van de toegangsgeulen naar de zeesluizen zal doorgaan tot de buffer aan slib in de bodem (ca. 6-7 miljoen ton in 1986, [Bastin, 1993]) uitgeput raakt. Op termijn zal daardoor ook het slibpercentage in de toegangsgeulen verder afnemen.

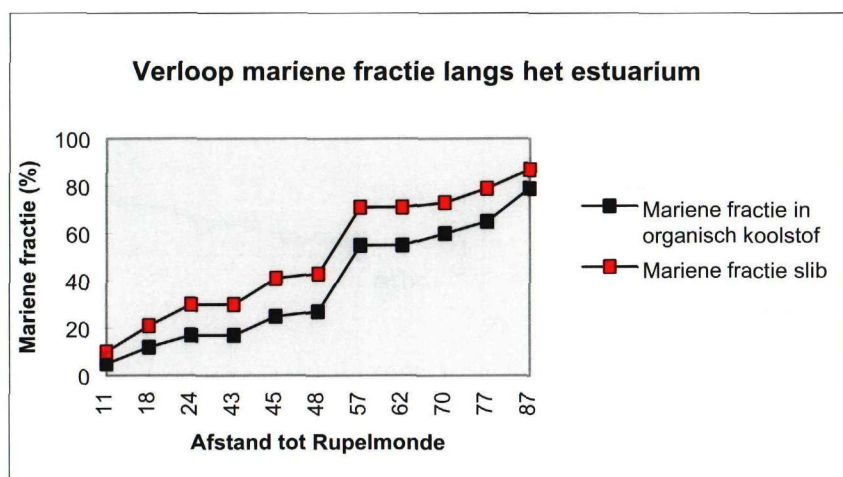
Het slibpercentage van de drempels is bijna tot de helft gereduceerd (van 13% naar 7%). Wanneer de afname van het slibpercentage van de drempels representatief is voor de gehele bodem van de Beneden Zeeschelde, is uitgaande van een voorraad slib volgens [Bastin, 1993], in de periode 1991-1997 ongeveer 3 miljoen ton slib uit de Beneden Zeeschelde onttrokken. Indien dit plaatje klopt moet de slibbuffer in de bovenste meter van de waterbodem momenteel nog ongeveer 3-4 miljoen ton slib bedragen. De trendlijnen in de ontwikkeling van het slibpercentage van de drempels in figuur 5.3 suggereren dat, wanneer de huidige tendens zich voortzet, ont-slibbing binnen 10 jaar leidt tot "verwoestijning" van de waterbodem van de Beneden Zeeschelde.

5.2 De $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding in organisch stof als maat voor de samenstelling van het slib in suspensie

De $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding in het zwevend organisch materiaal neemt in veel estuaria sterk toe in zeewaartse richting. Over het algemeen heeft organisch koolstof afkomstig van de rivier een lagere $\delta^{13}\text{C}$ waarde dan het mariene organisch koolstof. Door dit verschil kunnen de fracties marien en fluviatiel organisch koolstof bepaald worden. Het probleem is de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding van puur marien ($\delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}$) en fluviatiel slib ($\delta^{13}\text{C}_{\text{fluv}}$) te bepalen. Deze verhoudingen dienen als randvoorwaarden voor de berekening van de beide koolstoffracties in het estuarium zelf. Het resultaat van deze berekening is erg gevoelig voor de keuze van de randvoorwaarden $\delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}$ en $\delta^{13}\text{C}_{\text{fluv}}$ [Verlaan, 1997d].

Organisch koolstof bestaat bijna volledig uit deeltjes met een afmeting gelijk aan fijn slib. Uit de fracties fluviatiel en marien organisch koolstof kunnen daarom de fracties in het totaal zwevend stof bepaald worden. Bij deze omrekening dient rekening gehouden te worden met het feit dat het percentage organisch koolstof in zwevend stof afkomstig van de rivier over het algemeen hoger ligt dan bij zwevend stof met een mariene herkomst. De fluviatische fractie in het zwevend stof is daarom lager dan de fluviatische fractie van het organisch koolstof. Ook wordt door biologische activiteit in een groot deel van het jaar koolstof geproduceerd, waardoor de verhouding tussen de beide koolstofisotopen kan veranderen zonder dat dit iets zegt over de fracties marien en fluviatiel slib. Daarnaast heeft het fytoplankton een voorkeur voor de lichtere ^{12}C isotoop, hetgeen invloed kan hebben op de waargenomen verhouding. Schorplanten hebben als gevolg van een andere fotosynthese een afwijkende $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding. Wanneer deze planten afsterven kan dit lokaal de waargenomen $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding in het organisch stof beïnvloeden. Tenslotte kan erosie van oud afgezet materiaal het verloop in de tijd van de gemeten verhouding ernstig verstoren. Met deze factoren dient rekening gehouden te worden bij het gebruik van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding als een maat voor de fractie fluviatiel slib. Rekening houdend met het lagere percentage organisch stof in marien slib is door [Van Maldegem, 1993a & b] de $\delta^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding in het slib gebruikt om de verhouding tussen het fluviatiel en het marien slib te bepalen. Figuur 5.5 toont de door van Maldegem gebruikte verhoudingen in organisch koolstof en in slib in bodemsediment.

Figuur 5.5: Het verloop van de mariene fractie in het organisch koolstof en in zwevend slib als functie van de afstand tot Rupelmonde zoals gebruikt door [Van Maldegem, 1993a & b]. Naar [Verlaan, 1997d].



5.3 Het verloop van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ koolstofisotopenverhouding bij Schaar van Ouden Doel in de periode '89-'97

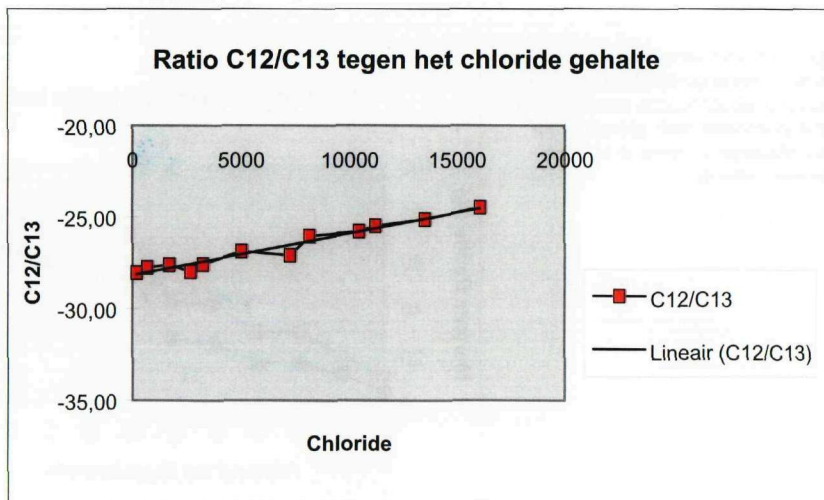
De afgelopen vijf jaar is er een grote hoeveelheid slib uit de Beneden Zeeschelde verwijderd. Dit slib is een mengsel van marien en fluviatiel materiaal. De vraag rijst of de slibverwijdering de grootte van het transport van fluviatiel slib over de Belgisch-Nederlandse grens heeft beïnvloed. Zoals aangegeven in paragraaf 5.2 kan de verhouding tussen de fracties marien en fluviatiel slib bepaald worden uit de koolstofisotopen ^{12}C en ^{13}C in het slib. Een wijziging van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding op de grens is een indicatie voor een verandering in het transport van fluviatiel slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde.

In het achterhoofd dient gehouden te worden dat de vermindering van slibafvoer via de Schelde in de periode '89-'97 ook aanleiding kan zijn geweest tot wijziging van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding ter hoogte van de grens. Ook variaties in de afvoer van rivierwater leiden tot verschillen in deze verhouding op een vaste lokatie. Tenslotte kan erosie van oud slib uit de bodemvoorraad lange tijd de verhouding op het oude peil houden.

Wanneer slib het grootste gedeelte van de tijd in suspensie is, zullen wijzigingen in rivierwaterafvoer praktisch momentaan zichtbaar worden in de verhouding tussen de slibfracties. Gedraagt het slib zich echter voornamelijk als sediment, dan zijn de wijzigingen in de verhouding minder snel te verwachten.

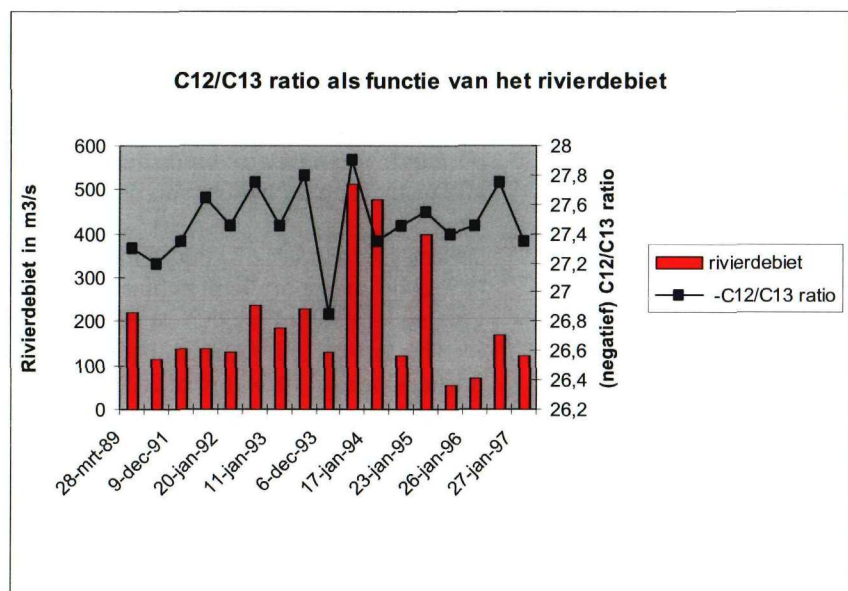
Om veranderingen vast te kunnen stellen in het zwevend stof aan het wateroppervlak, zijn de centrifuge monsters opgevraagd van het meetpunt Schaar van Ouden Doel vanaf 1989 [Spronk, 1998]. Besloten is de analyse te beperken tot de maanden december en januari van de jaren '89 tot en met '97. De keuze van deze periode hangt mede samen met het gegeven dat gebruik van de koolstofisotopen verhouding als slibtracer alleen mogelijk is bij conservatief gedrag. Dat wil zeggen dat koolstof niet wordt verbruikt of bijgevormd wordt. Voor de wintermaanden is dit inderdaad het geval. In figuur 5.6 is de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio als functie van het chloride gehalte uitgezet voor een van de vaartochten. Het lineair verloop van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio als functie van het chloride gehalte duidt erop dat het zwevend stof zich als water gedraagt en permanent in suspensie is. Hierop komen we in de volgende paragraaf terug.

Figuur 5.6: Het verloop van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio als functie van het chloride gehalte. SAWES opname (90196).



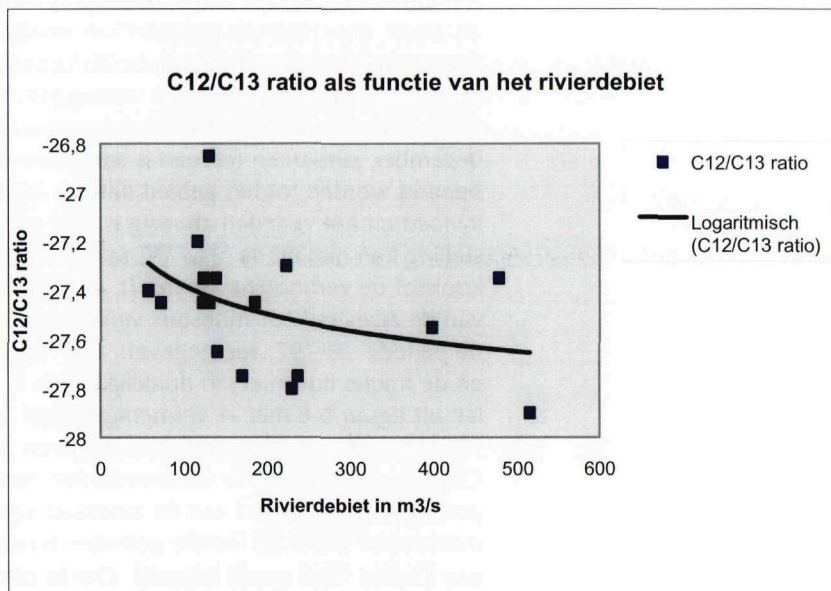
Aangetoond is dat de koolstofisotopen verhouding voor de wintermaanden als tracer voor rivierslib gebruikt kan worden. Dit betekent dat we uit deze verhouding het percentage rivierslib kunnen bepalen en een ruimtelijk beeld van het verloop kunnen vastleggen. Vanwege het feit dat conservatief gedrag van de koolstofisotopenverhouding slechts in de maanden december, januari en februari is aangetoond, moet dit ruimtelijk beeld beperkt worden tot het gebied dat een korte meentijd heeft, zodat de invloed uit het verleden afwezig is. Het verloop in de tijd van de slibsaamstelling kan niet uit de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio bepaald worden, omdat produktie van koolstof de verhouding verstoort. In figuur 5.7 staan de analyseresultaten van de zwevendstof-monsters van de maanden december en januari over de periode '89-'97 weergegeven. Om het verband tussen het rivierdebiet en de fractie fluviatiel slib duidelijker aan te geven, zijn de negatieve getallen uit figuur 5.6 met -1 vermenigvuldigd. Een hoge waarde voor de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio correspondeert nu met een groot aandeel fluviatiel slib. Omdat in '89 en '90 de winterwaarden niet beschikbaar waren, is in deze jaren gebruik gemaakt van de monsters van maart respectievelijk april. Het rivierdebiet wordt bij Schelle gemeten terwijl de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio bij Schaar van Ouden Doel wordt bepaald. Om te corrigeren voor de tijd die het rivierwater nodig heeft om Schaar van Ouden Doel te bereiken is het rivierdebiet gemiddeld over de maand voorafgaand aan de dag waarop de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio bepaald is.

Figuur 5.7: Het verloop van de (negatieve) $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio in het zwevend stof en het rivierdebiet over de periode '89-'97.



In de tabel is geen duidelijke verandering van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio te zien. Het gemiddelde bedraagt -27.47 en de standaardafwijking 0.25. Sommige pieken in het rivierdebiet corresponderen met een hoog fluviatiel percentage in het zwevend stof bij Schaar van Ouden Doel. Dit is echter niet voor alle pieken zo. Het verband tussen het rivierdebiet en de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio wordt duidelijker uit figuur 5.8, waar een logaritmische curve door de punten is getekend.

Figuur 5.8: Het verband tussen het fluviatiel percentage in het zwevend stof bij Schaar van Ouden Doel en het Schelde debiet bij Rupelmonde.



Het verloop van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio door de jaren heen duidt erop dat zowel de afname van de slibaanvoer via de Schelde als de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde geen noemenswaardige consequentie heeft gehad voor de samenstelling van het zwevend stof aan het wateroppervlak. Een verklaring hiervoor kan zijn dat erosie van oud afgezet slib in de Beneden Zeeschelde de sedimentsamenstelling min of meer op het oude peil houdt. Dit zou betekenen dat het slib dat naar de Westerschelde wordt getransporteerd, voor een groter percentage dan eerder werd aangenomen, afkomstig is uit de bodem van de Beneden Zeeschelde.

De analyses zijn uitgevoerd op monsters genomen aan het wateroppervlak. Niet al het transport vindt echter aan het wateroppervlak plaats. Vooral de grovere slibdeeltjes hebben de neiging zich voornamelijk onder in de waterkolom op te houden. Mogelijk is de verhouding tussen de beide slibfracties onder in de waterkolom wel gewijzigd in de periode '89-'97. Er zijn echter geen analyses om dit te staven, zodat het bij speculeren blijft.

5.4 Verhouding tussen de fracties fluviatiel en marien slib in het zwevend stof over de periode '87/'88-'95/'96 bepaald met factor analyse

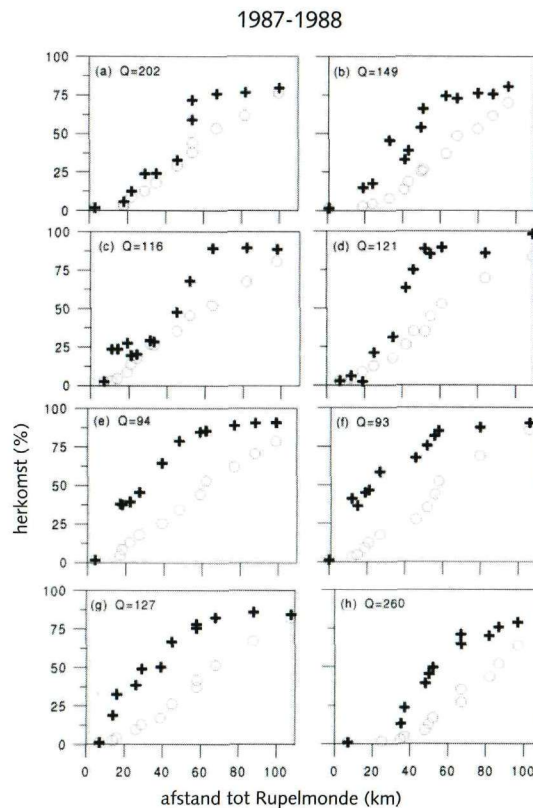
In [Verlaan et al., 1997c] wordt een methode beschreven waarmee uit de concentraties van verschillende metalen in het zwevend stof de verhouding tussen de fractie fluviatiel en marien materiaal bepaald kan worden. Deze methode wordt factor analyse genoemd en is toegepast op een zestiental metalen. De concentratie van verschillende metaal elementen wordt beschreven als een lineaire combinatie van een aantal element structuren, factoren genoemd, welke door analyse van de correlaties tussen de verschillende metalen samengesteld worden. Elke factor bestaat uit een aantal elementen elk met een zeker gewicht. Het gewicht bepaald tot in welke mate de variantie in de metaal concentratie bepaald wordt door een bepaalde factor. De factorscore bepaald in hoeverre een factor verantwoordelijk is voor de gemeten metaalconcentratie. De factoren bleken nauw te corresponderen met vijf fysisch-chemische processen, waaronder de aanvoer van fluviatiel en marien slib. Met deze vijf factoren kan ca. 83% van de variantie in de dataset verklaard worden. Wellicht is een zesde factor verantwoordelijk voor (een deel van) de resterende variantie.

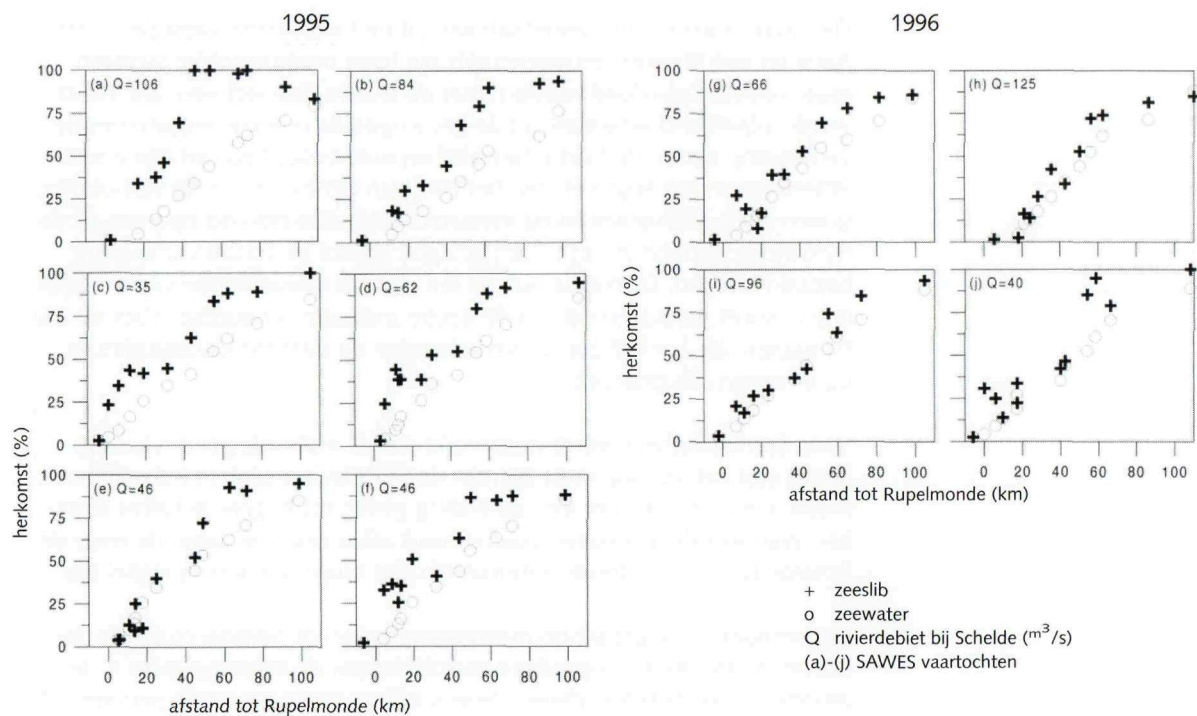
De fractie marien en fluviatiel slib kan uit de factorscores bepaald worden. Aanvoer van fluviatiel en marien slib zijn twee onafhankelijke factoren maar kunnen beïnvloed worden door de andere drie factoren. Dit effect wordt uitgefilterd waardoor uit de gecorrigeerde metaalconcentraties de verhouding tussen de fractie fluviatiel en marien slib bepaald kan worden. Wanneer aan het begin en aan het eind van het estuarium de verhouding tussen beide slibfracties en de metaalconcentraties bekend zijn, kan uit de metaalconcentratie in het tussen gelegen gebied de fractie verhouding bepaald worden. De fractie marien slib aan het rivieruiteinde van het estuarium wordt gelijk gesteld aan de fractie zeewater ter plaatse. Voor de fractie marien slib aan het zee-uiteinde worden de elementconcentraties in puur marien slib gebruikt.

Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat de methode geen rekening houdt met het verloop in de tijd van de gehalten metalen in het sediment. Erosie van oud sediment kan aanleiding geven tot hogere gehalten metalen. Wanneer deze metalen voornamelijk afkomstig zijn vanaf de rivier de Schelde geeft de methode automatisch een hoger aandeel fluviatiel slib.

De methode is toegepast op meetgegevens van de SAWES cruises in '87-'88 en in '95-'96. Een opvallend verschil tussen de beide periodes is de grootte van de Schelde afvoer. Deze is tijdens de cruises in de periode '87-'88 tweemaal zo hoog als in de periode '95-'96 (145 om 70 m³/s). Dit maakt vergelijking van beide periodes niet echt gemakkelijk. De resultaten van de cruises zijn gegeven in figuur 5.9.

Figuur 5.9: De fractie marien slib in zwevend stof monsters tijdens de verschillende tochten in de SAWES campagnes van '87-'88 en '95-'96, naar [Verlaan, 1997c].



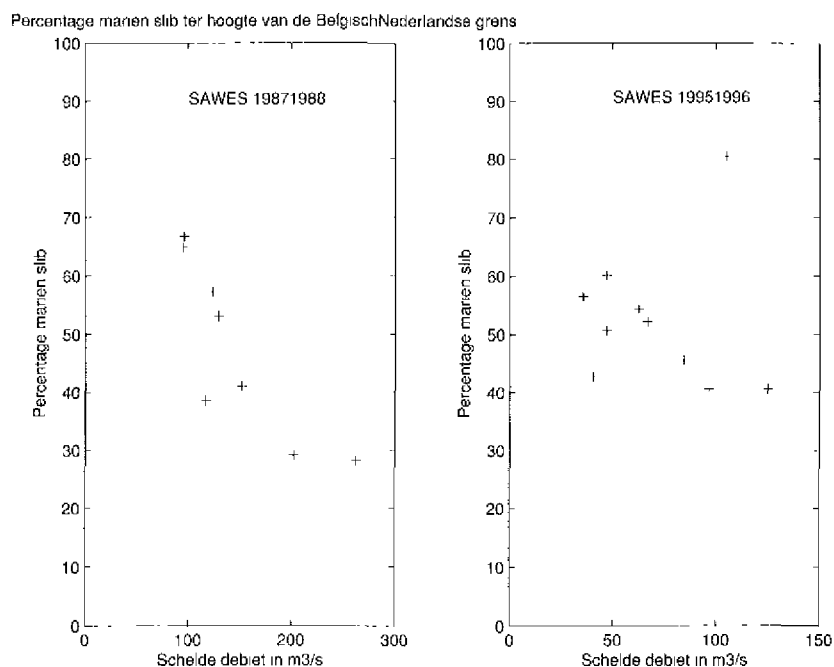


De mengcurve van rivierwater met zeewater laat in beide periodes een lineair verloop met de afstand tot Rupelmonde zien. De curve voor zwevend stof laat een maximale gradiënt zien bij lage saliniteit. In de periode '87-'88 is de fractie zwevend stof met mariene herkomst beduidend groter dan de fractie zeewater. In deze periode is er een duidelijk verband tussen de grootte van de mariene fractie in het zwevend stof en de rivierafvoer. Bij hoge rivierafvoer treedt een zeewaartse verschuiving op van de mengcurve. In de periode '95-'96 lijken de curven voor het percentage zeewater (saliniteit) en de fractie marien slib in het zwevend stof veel meer op elkaar. Het slib in suspensie lijkt zich meer als water te gedragen. Een afname van de sedimentatie - ofwel een afname van de korrelgrootte van het marien slib - kan hiervan de oorzaak zijn. Een dergelijke afname in korrelgrootte wordt echter niet waargenomen. Een toename van de fractie fluviaal slib op de grens zou veroorzaakt kunnen worden door erosie van oud afgezet slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde. Het slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde bevat als gevolg van de hoge slibaanvoer via de Schelde uit het verleden een relatief hoog fluviaal gehalte.

De correlatie tussen de mariene fractie in het zwevend stof en de rivierafvoer is op de grens veel kleiner dan in '87-'88. Dit kan erop duiden dat het rivierslib in grote mate sedimenteert in de toegangsgeulen tot de zeesluizen en alleen het allerfijnste materiaal als een soort spoeltransport met het rivierwater naar zee verdwijnt. Een hoge rivierafvoer zorgt dan niet automatisch voor een sterke aanvoer van rivierslib.

De grootte van de mariene fractie is in beide periodes sterk variabel. Bij hoge rivierafvoer neemt het percentage langzaam toe van een paar procent bij Rupelmonde tot ca. 80% bij Vlissingen. Bij lage afvoer neemt het percentage tussen Rupelmonde en de grens sterk toe tot ca. 65%. Bij Vlissingen bedraagt het uiteindelijk ca. 90%.

Figuur 5.10: Marien aandeel in het zwevend stof op de Belgisch-Nederlandse grens als functie van het rivierdebiet tijdens de SAWES campagnes van '87-'88 en '95-'96, naar [Verlaan, 1997c]



Vergelijking van beide periodes is niet eenvoudig vanwege de afwijkende rivierafvoer. Bij een rivierafvoer van 100 m³/s lijkt de mariene fractie in het zwevend stof in de periode '95-'96 op de grens iets afgenomen te zijn. Een verklaring hiervoor is dat erosie van slib met hogere gehalten metalen invloed kan hebben op de verhouding tussen de fracties marien en fluviatiel slib. Dit komt overeen met de verwachting die in paragraaf 4.6.2 werd uitgesproken.

De verhouding tussen de fracties fluviatiel en marien slib blijkt erg afhankelijk te zijn van de rivierafvoer. Het wordt in [Verlaan et al., 1997c] dan ook aanbevolen balansen voor hoge en lage rivierafvoer te construeren. Verdeling van sedimentatie over deze twee categorieën is echter niet eenvoudig.

Het bepalen van de verhouding tussen de fracties marien en fluviatiel slib op basis van de $\delta^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding in het organisch stof, is gevoelig voor fouten vanwege de verschillen in organisch stof gehalte tussen fluviatiel en marien slib. Het percentage organisch stof in fluviatiel slib is bij benadering twee zo hoog als dat in marien slib. Daarnaast maken we bij factoranalyse gebruik van variaties in concentratie van een groot aantal stoffen in het marien en fluviatiel slib om de beide slibfracties te berekenen, terwijl de $\delta^{13}\text{C}$ koolstofisotopen methode slechts op de verhouding in organisch stof gebaseerd is. Ook is er meer informatie over de metaalconcentraties aan het rivier- en het zee uiteinde van het estuarium beschikbaar dan over de $\delta^{13}\text{C}$ verhouding in organisch stof. Het percentage fluviatiel slib bij lage rivierafvoer, op basis van de $\delta^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding in het slib, bedraagt ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens volgens [Salomons & Eysink, 1981] 70-80%. Op basis van factoranalyse slechts 20-40%. Het verschil wordt grotendeels toegeschreven aan de variatie in het gehalte organisch stof.

5.5 Verhouding tussen de fluviatiele en mariene fractie in het bodemsediment in de periode '90-'93 bepaald met factor analyse

Ook de verhouding tussen de fluviatiele en mariene fractie in het bodemslib (fractie < 63µm) van het Schelde estuarium kan bepaald worden met factor analyse [Verlaan, 1997d]. Ditmaal zijn er drie fysisch-chemische processen geïdentificeerd. De aanvoer van riviërslib is er één van.

Wanneer nu de metaalconcentraties van puur fluviatiel en puur marien bodemslib bekend zijn, kan lokaal de verhouding tussen de fracties fluviatiel en marien slib bepaald worden uit de metaalconcentraties op een willekeurige plaats in het estuarium. De achtergrond waarde van de verschillende metaalconcentraties op de Noordzee worden gebruikt voor puur marien slib. Voor puur fluviatiel slib is het lastiger een metaalconcentratie te bepalen omdat er geen bodemonsters bij Rupelmonde genomen zijn.

Als alternatief worden metaalgehalten in monsters van zwevend stof bij Rupelmonde gebruikt. Op twee manieren kan het gebruik van zwevend stof gegevens voor bodemsediment tot fouten leiden: verschil in korrelgrootte verdeling en de sedimentatie snelheid van het zwevend stof. De metaalconcentraties zijn afhankelijk van de korrelgrootte verdeling (beste hechting aan fractie < 2µm). De lutumfractie in zwevend stof is echter vergelijkbaar met de fractie in bodemsediment. De sedimentatie snelheid is een maat voor de tijd die het duurt voordat het zwevend stof op de bodem terug gevonden kan worden. In de toegangsgeulen naar de Zandvliet en Berendrecht sluizen is deze 1 à 2 cm per dag waardoor het bodemonmonster hetzelfde materiaal bevat als het zwevend stof (er is geen tijdsverschuiving). Op de drempels is de sedimentatie snelheid echter veel lager (1 à 2 cm per jaar) waardoor een bodemonster zwevend stof van een aantal jaren bevat. De fout in de berekende mariene fractie in het bodemslib die hierdoor wordt gemaakt, wordt geschat op 5-10%.

De mariene fractie in het bodemslib is aan de hand van meetgegevens over de periode '90-'93 bepaald op de boven beschreven wijze.

Stroomopwaarts van Antwerpen is de fractie marien slib in de bodem lager dan 20%, daarna vindt op het traject tussen Lillo en Saeftinge een sterke toename van 20 naar 75% plaats. Een geleidelijk toename tot 95% bij Vlissingen is te zien stroomafwaarts van Saeftinge. Het effect van variatie in de rivierafvoer op de samenstelling zoals deze in het zwevend stof aanwezig is, wordt door de lage sedimentatie snelheid uitgefilterd. De variatie in rivierdebiet en slibaanvoer over jaren blijft wel relevant.

De ruimtelijke variabiliteit in de Beneden Zeeschelde is relatief groot (zie figuur 5.11). Dit komt doordat het lutumgehalte in het slib (<63µm) uit de drempels en de toegangsgeulen verschilt (hoger in drempels). De metaalconcentratie wordt hierdoor beïnvloed en daardoor het aandeel marien slib.

De gradiënt in de mengcurve van het bodemslib is het grootst in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens. De curve lijkt veel op die van zwevend stof bij een hoge rivierafvoer. Dit wekt de suggestie dat sedimentatie van slib voornamelijk in periodes met hoge afvoer plaatsvindt. Op grond van de mengcurve van bodemslib kan worden geconstateerd dat in de Westerschelde vooral marien slib sedimenteert en in de Beneden Zeeschelde vooral fluviatiel slib. Bij de Belgisch-Nederlandse grens zijn de mariene en fluviatiele fracties ongeveer gelijk.

Bij lage afvoer is de fractie marien slib in het zwevend stof dat stroomopwaarts van de Zandvliet en Berendrecht sluizen wordt aangetroffen, veel groter dan er in het bodemslib terug te vinden is. Blijkbaar vindt er in deze situatie nauwelijks enige sedimentatie plaats van marien slib. Het fluviatiel slib sedimenteert juist nauwelijks stroomafwaarts van deze sluizen. De zee-

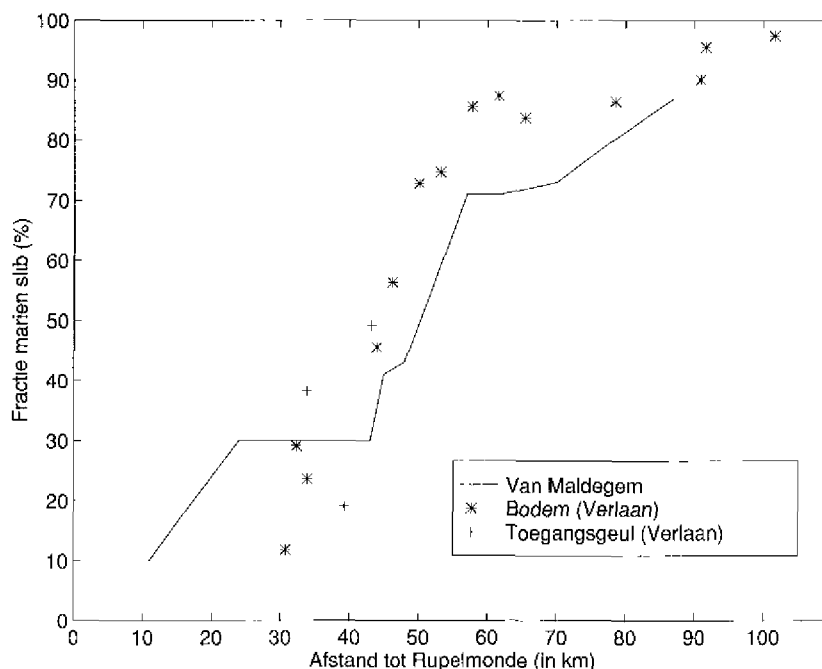
sluizen Zandvliet en Berendrecht blijken uiterst efficiënt in het vangen van zowel fluviatiel als marien slib.

Er is geen invloed van het Kanaal van Gent naar Terneuzen teruggevonden in het bodemsediment (het kanaal is geen factor). Evenmin wordt het effect van de haven van Zeebrugge in het bodemsediment teruggevonden.

5.5.1 Een vergelijking tussen de periode '75-'85 gebaseerd op de $\delta^{13}\text{C}$ koolstofisotopen verhouding in het slib en '90-'93 op basis van factoranalyse.

In figuur 5.11 zijn de mengcurves voor het bodemslib volgens Verlaan en volgens Van Maldegem (gecompenseerd voor het gehalte organisch stof in beide slibfracties) naast elkaar gezet. Door de toestand in de bodem te vergelijken, wordt het getij effect uitgefilterd.

Figuur 5.11: Mengcurves in bodemsediment voor '75-'85 [Van Maldegem, 1993b] volgens ($\delta^{13}\text{C}$ methode en voor '90-'93 [Verlaan, 1997d] met behulp van factor analyse.



De mengcurves bepaald aan de hand van beide methodes vertonen goede overeenkomsten en geven een maximale gradiënt tussen 40 en 60 km van Rupelmonde. In de curve volgens Verlaan is deze echter sterker en verder stroomopwaarts gelegen. Van Maldegem baseert zijn curve op een meting uit '87. De aanvoer van slib door de Schelde en het rivierdebiet lag in het jaar voorafgaand aan deze meting hoger dan in de periode '90-'93: 127 m³/s om 94 m³/s. De aanvoer van marien slib naar de Beneden Zeeschelde daarentegen mag ongewijzigd verondersteld worden. Hierdoor is het aandeel marien materiaal in het slib groter geworden, hetgeen in figuur 5.11 tot uiting komt.

Onttrekking van slib aan de bodem in de jaren '92 en '93 kan oorzaak zijn van verschillen in de mengcurves. Vergelijking van de situatie in '75-'85 met bijvoorbeeld de toestand in '96 kan meer inzicht geven in het effect van slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde op de verhouding tussen zeeslib en rivierslib in de bodem van het estuarium. Het is voornamelijk niet zeker of de verschillen in verhouding zee- en rivierslib (gesignaleerd tussen de periodes '75-'85 en '90-'93), aan de slibverwijdering toegeschreven kan worden, daarvoor speelt variatie van het rivierdebiet en de afname van de slibaanvoer door de Schelde nog een te grote rol. De slibverwijdering, aan-

gevangen in '92, kan gezien het beperkte aantal bodemonster uit '93 dat in de analyse betrokken is, ook nog nauwelijks terug te vinden zijn.

5.6 Vergelijking zwevend stof concentraties en fracties tijdens de SAWES campagnes van '87/'88 en '95/'96

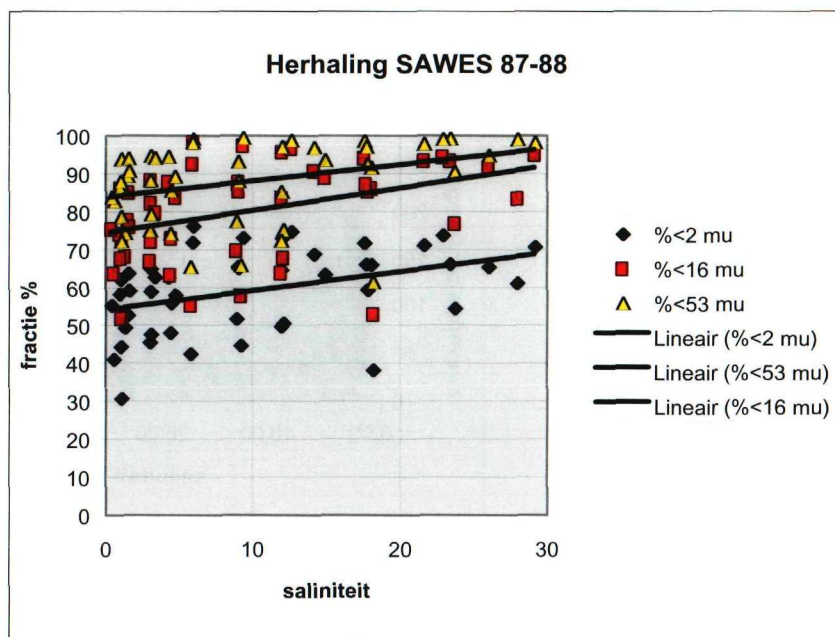
In de jaren '87-'88 en '95-'96 zijn maandelijkse scanningen van het oppervlaktewater op het traject Rupelmonde-Vlissingen uitgevoerd. In '87-'88 zijn 8 tochten gemaakt en in '95-'96 zijn 10 tochten gemaakt. Tijdens deze vaartochten is de concentratie van het zwevend stof aan het wateroppervlak bepaald. De omstandigheden, waaronder de tochten gemaakt zijn, waren zeer divers. Hierbij wordt bedoeld op weersomstandigheden, getijfase en getijkracht, golfklimaat, Scheldebiet en watertemperatuur. Door deze variërende omstandigheden kunnen de meetresultaten sterk uiteen lopen. Op 1 meter beneden het wateroppervlak is bemonsterd en gemeten. Het zwevende stof is met behulp van de centrifugemethode gewonnen. Uit het zwevende stof zijn humus en kalk verwijderd. Van het overblijvende minerale deel zijn de verschillende slibfracties bepaald. Het slibpercentage in het monster is gedefinieerd als het percentage minerale deeltjes met een korrelgrootte kleiner dan 53 μm . Ook is de minerale fractie <2 μm en <16 μm bepaald. Per tocht zijn de resultaten hiervan uitgezet als functie van de saliniteit.

Dit is tevens gedaan voor het gehalte aan zwevend stof. Hiermee zijn de monsters van de verschillende tochten beter vergelijkbaar. De monsters zijn over het algemeen namelijk niet bij een gelijke getij fase genomen. Door monsters bij een zelfde saliniteit met elkaar te vergelijken, kan hiervoor gecorrigeerd worden. Als gevolg van een variabel Schelde debiet verplaatst de zoutgradiënt zich in het estuarium. Ook voor dit effect kan op deze wijze gecompenseerd worden. Wat overblijft in het signaal is de hogere aanvoer van slib naar mate het rivierdebiet stijgt.

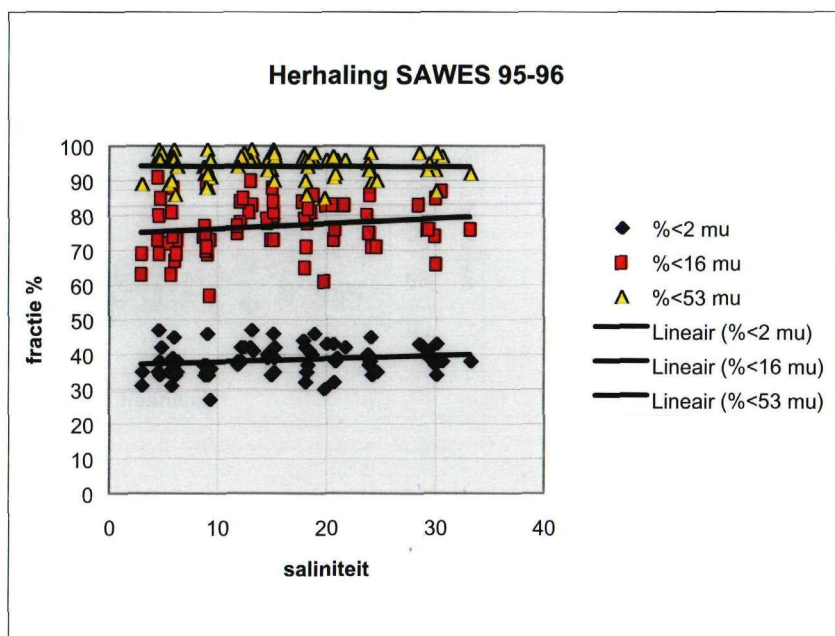
Het nadeel van de methode is echter dat monsters afkomstig van een verschillende lokatie met elkaar vergeleken worden, waardoor het begrip lokaal een wat vreemde betekenis krijgt. De afstand tussen de lokaties kan oplopen tot wel 10 km. Van de monsters genomen in '95 en '96 is tevens de mediane korreldiameter (D50 van de slibfractie < 53 μm) bepaald.

Om een totaal beeld te krijgen is voor beide monsterperiodes het percentage van de verschillende minerale fracties in al de monsters uitgezet tegen de saliniteit.

Figuur 5.12: De percentages van de fracties $<2\mu\text{m}$, $<16\mu\text{m}$ en $<53\mu\text{m}$ is de zwevend stof monsters in SAWES '87-'88.

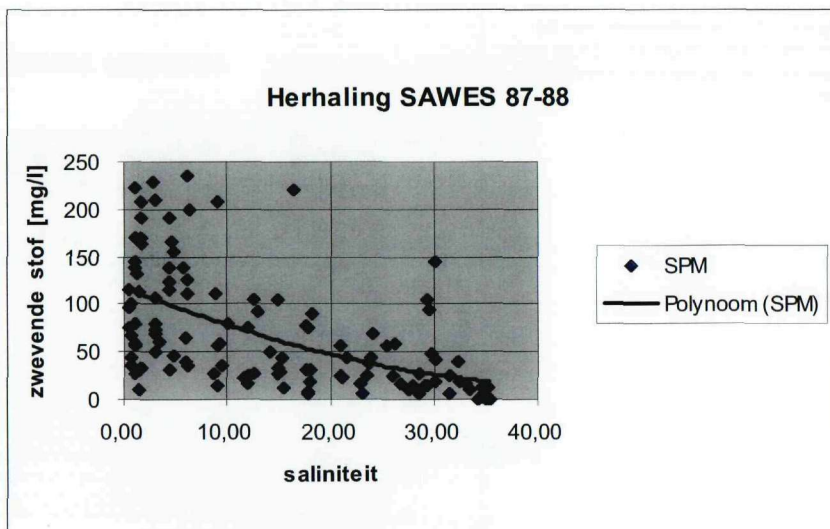


Figuur 5.13: De percentages van de fracties $<2\mu\text{m}$, $<16\mu\text{m}$ en $<53\mu\text{m}$ is de zwevend stof monsters in SAWES '95-'96.

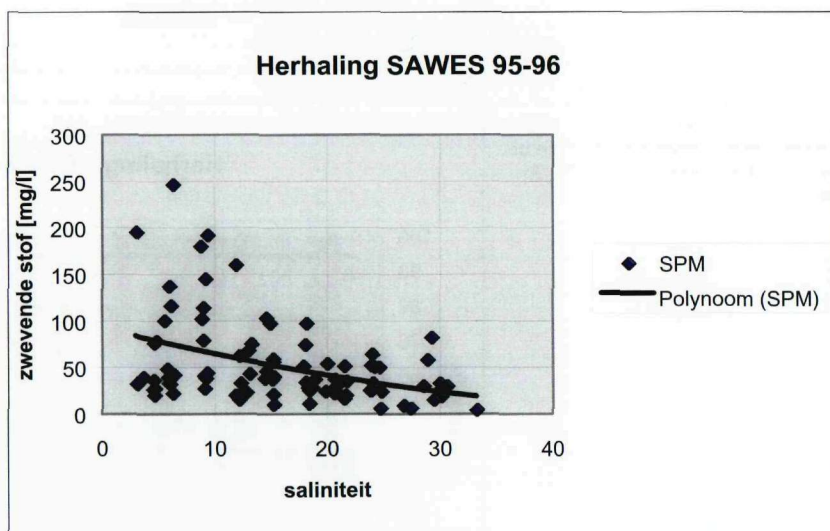


Dit is eveneens gedaan voor de zwevend stof concentratie.

Figuur 5.14: Zwevend stof concentratie aan het wateroppervlak in alle monsters tijdens SAWES '87-'88.



Figuur 5.15: Zwevend stof concentratie aan het wateroppervlak in alle monsters tijdens SAWES '95-'96.



In de puntenwolken zijn de meest voor de hand liggende gradiëntlijnen getekend. De gradiëntlijnen voor de verschillende slibfracties zijn lineair, voor het zwevende stof is gekozen voor polynomen. Deze gradiëntlijnen geven het gemiddelde verloop van de sediment samenstelling en de zwevend stof concentratie tegen de saliniteit. De invloed van variabele meetomstandigheden wordt zo enigszins uitgemiddeld (lokale effecten, afstand tot het midden van de geul etc.). De verhoogde concentratie door het structureel hogere Schelde debiet in de periode '87-'88 blijft in de gradiëntlijnen aanwezig. Zoals gezegd wordt bij middeling is geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat monsters genomen bij een zelfde saliniteit van een verschillende lokatie afkomstig kunnen zijn. De gradiëntlijn geeft dus slechts een benadering van het werkelijke verloop van sedimentfractie samenstelling en zwevend stof concentratie over het estuarium.

De gegevens van beide periodes wat betreft de sedimentsamenstelling en het zwevend stof gehalte bij Rupelmonde, bij de Belgisch-Nederlandse grens en ter hoogte van Vlissingen, zijn met elkaar vergeleken. De gradiëntlijnen kunnen gebruikt worden om gegevens op tussenliggende lokaties in het estuarium te vergelijken.

Het algemene beeld dat uit figuur 5.12 volgt voor de periode '87-'88, is dat het percentage van de fracties $<2\mu\text{m}$, $<16\mu\text{m}$ en $<53\mu\text{m}$ evenredig toeneemt met de saliniteit. De helling in de gradiëntlijnen in de figuur is voor alle fracties min of meer gelijk, wat duidt op een toename van de fractie $<2\mu\text{m}$ ten koste van de fractie $>53\mu\text{m}$. Dit betekent dat het materiaal in zeewaartse richting fijner wordt. Hiervoor is geen verklaring te geven. De spreiding van de gegevens is veel groter dan de trend. Het zwevend stof gehalte neemt zoals te verwachten was duidelijk af met de toename van de saliniteit (zie figuur 5.14) en varieert tussen de 20-120 mg/l.

Uit figuur 5.13 valt op te maken dat de sedimentsamenstelling in de periode '95-'96 (fracties $<2\mu\text{m}$, $<16\mu\text{m}$ en $<53\mu\text{m}$) nagenoeg constant is als functie van de saliniteit. Dit is geen triviale constatering als men bedenkt dat de getijsnelheden sterk variëren over het estuarium. De spreiding in de monsters bij een vaste saliniteit is niet erg groot. Bijna 95% van de minerale deeltjes heeft een korrelgrootte kleiner dan $53\mu\text{m}$ en wordt als slib gekarakteriseerd. De "gemiddelde diameter" (D50 waarde) ligt rond de $4\mu\text{m}$. Het gehalte aan zwevend stof neemt zoals te verwachten was duidelijk af met de toename van de saliniteit en ligt tussen de 20 en 80 mg/l (figuur 5.15).

De zwevend stof gehalten voor de periodes '87-'88 en '95-'96 verschillen sterk in het deel van het estuarium stroomafwaarts van Hansweert. De gradiënt in eerst genoemde periode is veel sterker op het traject Antwerpen-Hansweert. Een belangrijkste oorzaak hiervan is dat het Scheldedebiet in de periode '87-'88 gemiddeld $145\text{ m}^3/\text{s}$ was en in de periode '95-'96 slechts $70\text{ m}^3/\text{s}$ bedroeg. Ook de gesignaleerde tendens van een afnemende slibaanvoer in de jaren '90 bij een gelijkblijvend rivierdebiet speelt een rol. Gezien de invloed van deze factoren op de sedimentaanvoer is het onmogelijk de bijdrage van andere mogelijke factoren aan een lagere zwevend stof concentratie te kwantificeren. Het verloop van het zwevend stofgehalte kan niet toegeschreven worden aan de slibverwijdering.

De sedimentsamenstelling in beide periodes geeft eveneens een sterke verschillen te zien. Deze verschillen treden over het gehele estuarium op. In onderstaande tabel wordt de sedimentsamenstelling in het zwevend stof in de periodes '87-'88 en '95-'96 gegeven voor een drietal lokaties in het estuarium.

Tabel 5.3: Sedimentsamenstelling in het Schelde estuarium in de periodes '87-'88 en '95-'96.

Locatie	Fractie $<2\mu\text{m}$		Fractie 2-16 μm		Fractie 16-53 μm		Fractie $>53\mu\text{m}$	
	'87-'88	'95-'96	'87-'88	'95-'96	'87-'88	'95-'96	'87-'88	'95-'96
Rupelmonde	50	40	25	30	5	20	20	10
Grens	60	40	20	30	10	20	10	10
Grens	65	35	20	35	5	20	10	10

Uit tabel 5.3 wordt duidelijk dat de sedimentfractie met een korrelgrootte tussen de 16 en $53\mu\text{m}$ met ongeveer 20% toegenomen is ten koste van de fractie $<2\mu\text{m}$. De slibfractie $<53\mu\text{m}$ is redelijk constant gebleven. Alleen bij Rupelmonde is deze als gevolg van de hogere rivierdebieten in de periode '87-'88 wat kleiner.

Vergroving van het zwevend stof treedt over het gehele estuarium op en kan het gevolg zijn van de afgenomen slib aanvoer via de rivier de Schelde. Het rivierslib is van nature namelijk fijn en bevindt zich daarom boven in de waterkolom. Door de aanleg van rioolzuiveringsinstallaties en het gebruik

van wachtbekkens bovenstrooms van Rupelmonde kan een deel van het fijne slib uitgefilterd zijn. Deze conclusie is consistent met de gesignaleerde afname van het zwevend stof gehalte welke eveneens in verband gebracht kan worden met de afgenomen slibvracht van de Schelde.

Door de Vlaamse Milieu Maatschappij [Taverniers, 1997] is de korrelgrootte verdeling van het slib in de toegangsgeulen tot de verschillende zeesluizen bepaald. De gemiddelde fractie $< 2\mu\text{m}$ van de monsters genomen in de toegangsgeul naar de Kallosluis bedroeg 42%; in de toegangsgeulen naar de Zandvliet en Berendrecht sluizen lag dit percentage op ca. 38%. Opvallend is dat het materiaal tamelijk fijn is. De fractie $< 2\mu\text{m}$ is vergelijkbaar met het gehalte aan het wateroppervlak. Blijkbaar zijn de stroomsnelheden in de toegangsgeulen dusdanig laag dat ook het fijnste slib kan sedimenteren. Verwijdering van het slib uit de toegangsgeulen kan zo leiden tot een vergroving van de korrelgrootte. Het dient gezegd te worden dat de korrelgrootte analyse maar een beperkt aantal monsters betrof.

5.7 Kwaliteitsontwikkeling van het zwevend stof in het Schelde estuarium: een vergelijking tussen de SAWES tochten uit '87-'88 en '95-'96

In de voorgaande paragraaf is al aandacht besteed aan de SAWES tochten uit '87 en '95. De zwevend stof monsters die tijdens de verschillende vaartochten aan het wateroppervlak genomen zijn, zijn geanalyseerd op chemische kwaliteit. Van een groot aantal stoffen is bij elke vaartocht het verloop in gehalte over het estuarium bepaald.

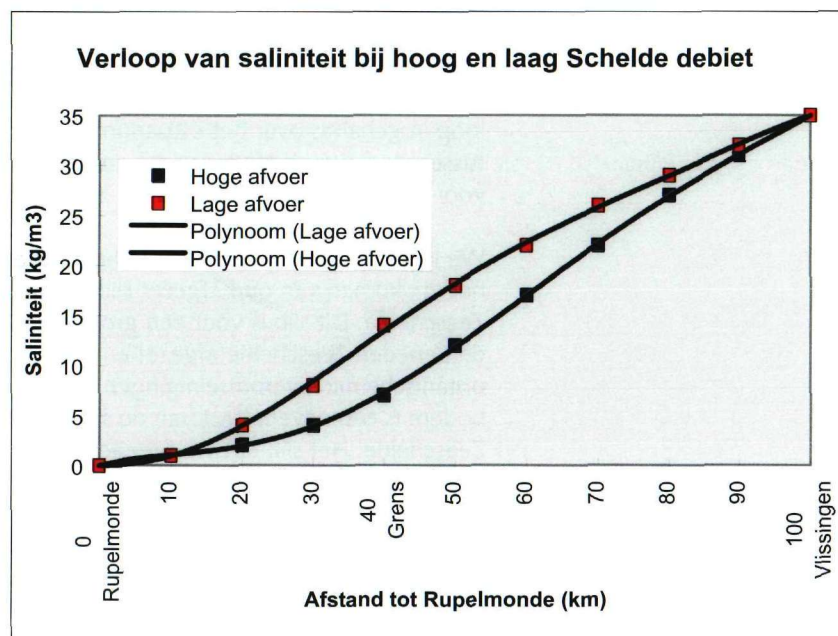
In figuur 5.16 worden de gehalten van een aantal spoormetalen en organische microverontreinigingen (Cd, Cu, Zn, Cr, B(a)P, Fla, PCB52, PCB153) van twee tochten uit '87 en '95 uitgezet tegen de saliniteit ter plaatse. De rivierafvoer ten tijde van monsternamen is voor de tochten uit '87 en '95 redelijk vergelijkbaar. Het rivierdebiet in de periode voorafgaand aan de monsternamen ligt in '87 echter hoger.

Het verloop van de gehalten van het achttal stoffen weergegeven in figuur 5.16 is opvallend te noemen. Aan de rivierzijde van het estuarium is voor alle stoffen een afname in de gehalten waar te nemen. Deze ontwikkeling wordt toegeschreven aan de reductie van emissies in het stroomgebied van de rivier de Schelde. Ook aan het zee-uiteinde van het estuarium is het gehalte minimaal op het niveau van '87 gebleven. Dit representeert de ontwikkelingen in emissies in het Noordzee bekken. In het gebied gelegen tussen de Belgisch-Nederlandse grens en Hansweert wordt voor al de acht stoffen een toename in de gehalten gesignaleerd over de periode '87-'95. Omdat dit een lokaal verschijnsel is moet de oorzaak ook gelegen zijn in lokale bronnen. De emissies echter in de Beneden Zeeschelde en Westerschelde zelf, zijn net als in het stroomgebied van de Schelde afgenomen de laatste tien jaar. Al gauw kijken we daarom naar de bodem en oeverranden van het estuarium.

Uit vergelijking van beide periodes willen we het effect van slibverwijdering op gehalten in zwevend stof afleiden. Om verschillen in gehalten toe te kunnen schrijven aan de slibverwijdering, dienen de omstandigheden waarbij de monsters genomen zijn zo goed mogelijk overeen te komen. Al opgemerkt is dat tijdens de SAWES campagne van '87-'88 het Schelde rivierdebiet gemiddeld aanmerkelijk hoger is geweest dan in de periode '95-'96. Dit heeft gevolgen voor de ligging van het troebelingsmaximum (zie paragraaf 2.3) en daarmee de slibconcentratie. Om te corrigeren voor variaties in rivierdebiet wordt vaak de gemeten concentraties of gehalten

uitgezet tegen de saliniteit te plaatse, zo ook in figuur 5.16. Het nadeel van deze methode wordt geïllustreerd aan de hand van figuur 5.17.

Figuur 5.17: Verloop van de saliniteit langs het Schelde estuarium bij hoog en laag Schelde debiet.



Bij een hoog rivierdebiet is de saliniteit ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens lager dan bij een laag rivierdebiet. De saliniteit die bij een hoog rivierdebiet op de grens gevonden wordt, treffen we bij een laag rivierdebiet aan ter hoogte van de Kallosluis. Vergelijking van gehalten in zwevend stof bij een vaste saliniteit maar verschillend rivierdebiet komt er op neer dat monsters afkomstig van verschillende lokaties met elkaar vergeleken worden. In het bovenstaande voorbeeld worden dan gehalten in zwevend stof uit de omgeving van de grens vergeleken met monsters genomen bij de Kallosluis. Het moge duidelijk zijn dat op deze wijze appels met peren worden vergeleken.

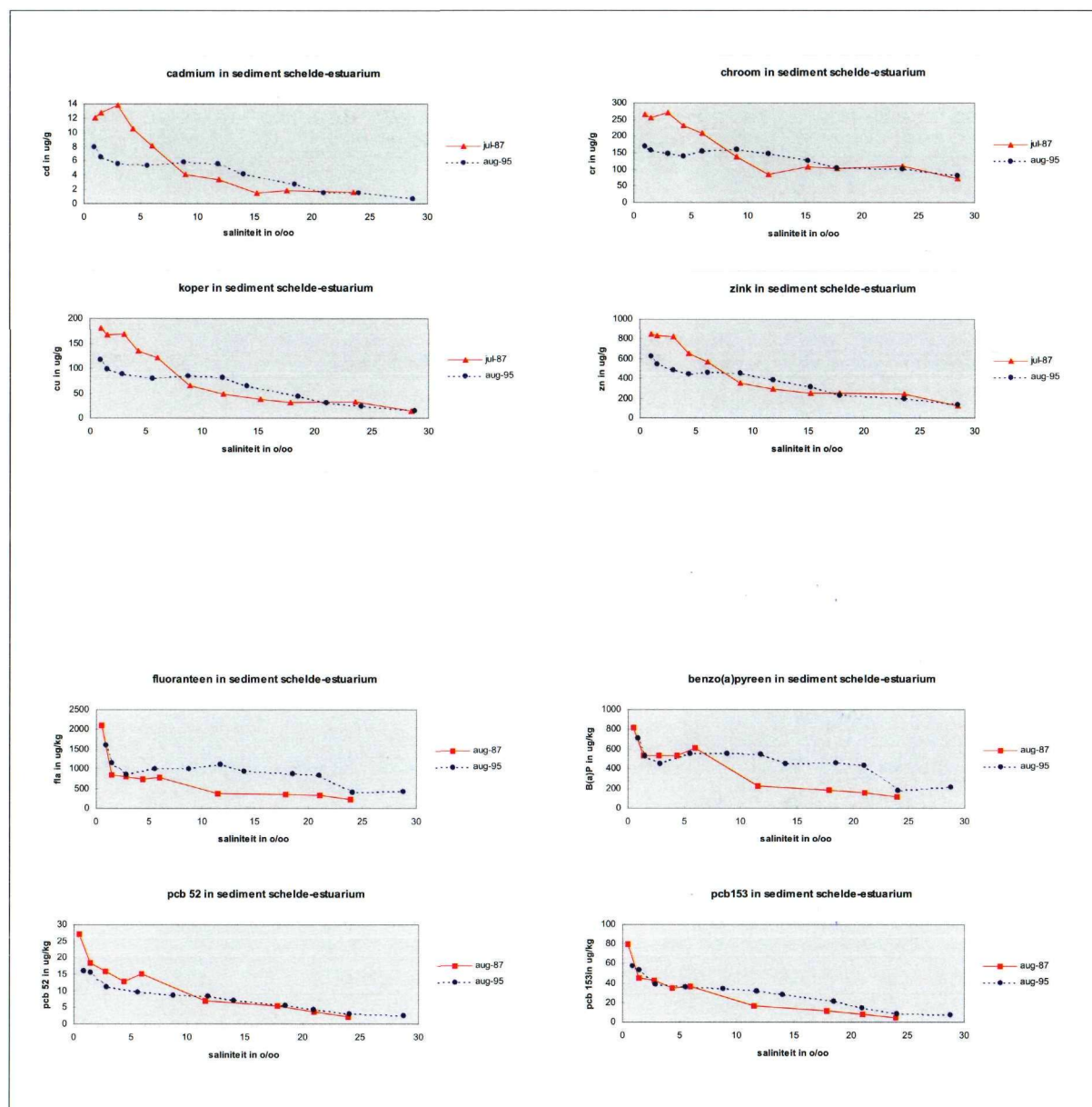
Soms is het verstandiger de gemeten gehalten in zwevend stof tijdens verschillende vaartochten op een vaste lokatie met elkaar te vergelijken, vooral wanneer lokale bronnen geacht worden een rol te spelen in de samenstelling van het aangetroffen sediment. Zo wordt meer recht gedaan aan de omstandigheden in de Beneden Zeeschelde, waar de samenstelling en de kwaliteit van het zwevend stof sterk kan variëren over relatief kleine afstand. Daarom is in figuur 5.18 het verloop van de gehalten van de verschillende spoormetalen en organische microverontreinigingen voor beide vaartochten nogmaals weergegeven, maar ditmaal uitgezet tegen de bemonsteringslokatie. Figuur 5.18 verschilt niet wezenlijk van figuur 5.16. De grafieken lijken iets in elkaar gedrukt ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens (40 km van Rupelmonde) vergeleken met de grafieken uit figuur 5.16. Blijkbaar is er hier een sterk verloop in saliniteit over een relatief kleine afstand. Er treedt geen verschuiving op van de grafieken van '87 en '95 ten opzichte van elkaar, hetgeen er op duidt dat de saliniteitsverdeling in '87 en '95 vergelijkbaar was. Op het traject Hansweert tot aan de grens is voor alle stoffen het gehalte in zwevend stof toegenomen in de periode '87-'95. De gehalten voor spoormetalen uit figuur 5.18 ter hoogte van Schaar van Ouden Doel, komen goed overeen met de waarden die op deze lokatie in het chemisch monitoringsmeetnet bepaald zijn. Voor organische microverontreinigingen zijn de verschillen groter.

De afname van gehalten van verschillende stoffen in het zwevend stof als gevolg van emissie reducties in het stroomgebied van de Schelde, zullen niet onmiddellijk in het gehele estuarium merkbaar zijn. Menging van nieuw aangevoerd slib met al aanwezig slib leidt tot "verdunding" van het effect stroomafwaarts van de bronnen. In figuur 5.18 echter vindt de overgang van "riviergehaltes" naar "zeegehalten" voor de meting uit '87 over een kleiner traject plaats dan in '95. In '95 treedt een meer geleidelijk verloop in gehalten over het estuarium op. In het midden van het estuarium tussen de Belgisch-Nederlandse grens en Hansweert liggen de gehalten voor al de onderzochte stoffen in '95 daarom hoger dan in '87.¹⁴

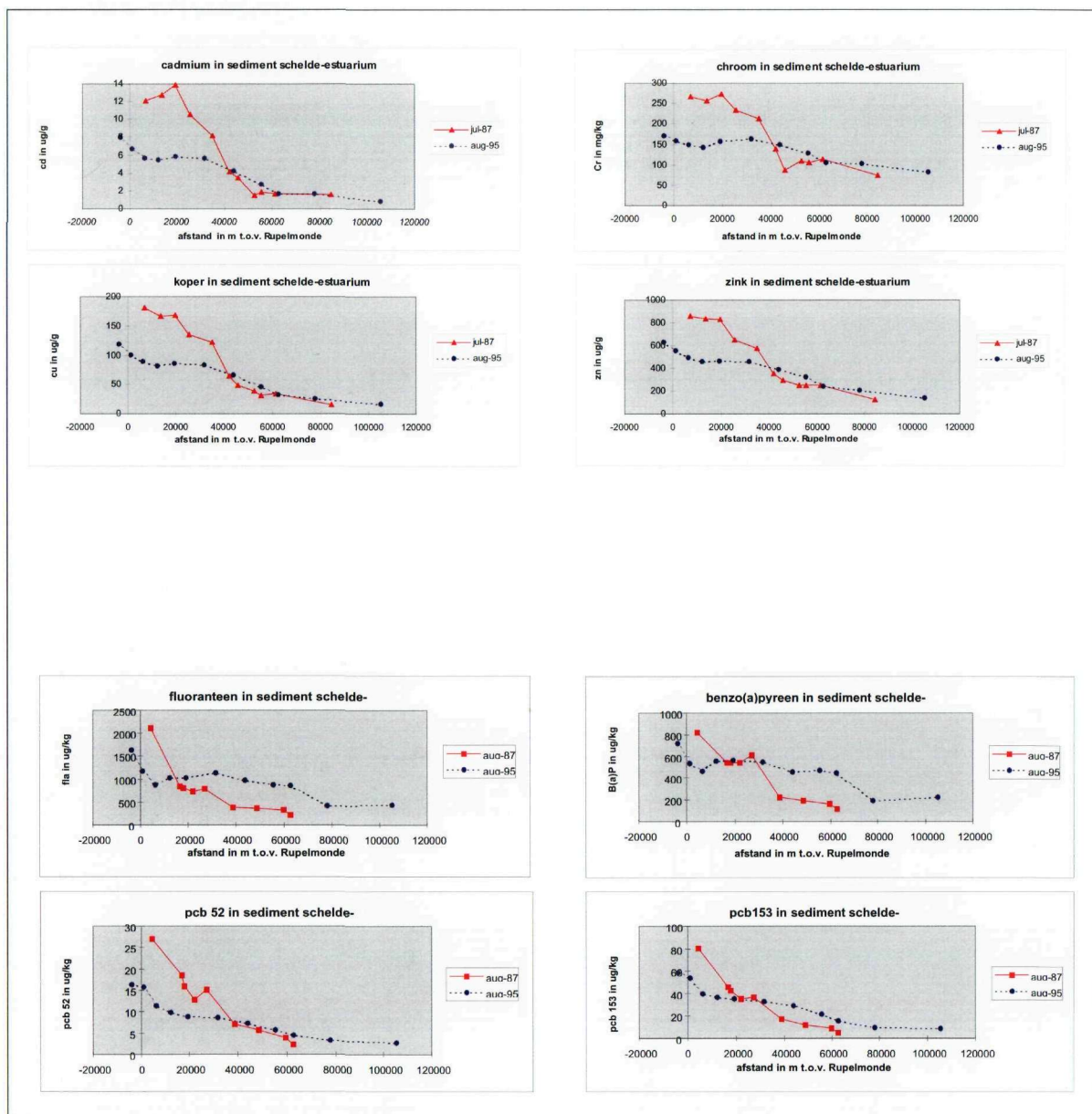
We wijten de hogere gehalten in het middentraject van het estuarium aan het vrij komen van oud afgezet slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde. Dit slib is voor een groot deel in de jaren zestig en zeventig in de Beneden Zeeschelde afgezet en heeft hoge gehalten spoormetalen en organische microverontreinigingen. Het vrijkomen van oud slib uit de bodem is een neveneffect van de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde. Het slib dat vroeger accumuleerde in de bodem komt in de huidige situatie voor een groot deel in de toegangseu len naar de zeesluisen terecht en wordt van daaruit verwijderd. Was er in het midden van de jaren tachtig nog sprake van een toename van de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde, momenteel neemt deze snel af. Slib dat in de jaren zeventig in de bodem terecht is gekomen wordt op deze wijze versneld uitgewisseld met de waterfase. Verwijdering van slib uit de toegangseu len betekent daarom sanering van de bodem van de Beneden Zeeschelde. Het oud afgezet slib uit de bodem wordt echter voor een deel naar de Westerschelde getransporteerd, waardoor de sedimentkwaliteit (tijdelijk) negatief wordt beïnvloed.

.....
¹⁴ Opgemerkt dient te worden dat niet tijdens alle vaartochten de gehalten in '95 hoger lagen dan corresponderende vaartochten in '87. Wat wel bij alle vergelijkingen naar voren kwam, was dat afname van gehalten ter hoogte van Rupelmonde als gevolg van emissie reducties in de periode '87-'95 snel afnam naar mate de grens genaderd werd. Deze ontwikkeling wijst sterk in de richting van een extra bron van vervuiling in de Beneden Zeeschelde

Figuur 5.16: Gehaltes Cd, Cu, Zn, Cr, B(a)P, Fla, PCB52, PCB153 in zwevend stof uitgezet tegen saliniteit tijdens twee SAWES tochten in '87 en '95.



Figuur 5.18: Gehaltes Cd, Cu, Zn, Cr, B(a)P, Fla, PCB52, PCB153 in zwevend stof uitgezet tegen de lokatie tijdens twee SAWES tochten in '87 en '95.



5.8 Andere bronnen van slib

De balans van de Beneden Zeeschelde welke is weergegeven in tabel 4.4 sluit door aan te nemen dat er jaarlijks een zekere hoeveelheid slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde erodeert. De vraag is of de bodem de enige bron van slib in het gebied is, of dat er andere slibleveranciers zijn. In deze paragraaf wordt bekeken of andere bronnen een significante post in de balans kunnen betekenen.

5.8.1 Baggerwerkzaamheden op de drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde en in de Beneden Zeeschelde

Elk jaar wordt er op de drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde een grote hoeveelheid sediment gebaggerd teneinde de vaargeul op diepte te houden. Het gebaggerde sediment wordt over het algemeen gestort in de scharen in de nabijheid van de drempel, of iets westelijk van de baggerlokatie. In de jaren '95 en '96 bedroeg de baggerinspanning in dit deel van het estuarium 7 miljoen m³ per jaar. Het sediment op de drempels bestaat grotendeels uit zand en het slibpercentage bedraagt 0 tot 5%, zie figuur 5.1. Uit deze figuur is eveneens op te maken dat het slibpercentage van de drempels bij Bath en Zandvliet over de periode '91-'97 met 1 à 2% is afgenomen. Of deze trend zich voortzet in westelijke richting is niet bekend.

De vraag is nu of de baggerwerkzaamheden op de drempels een significant bijdrage kunnen leveren aan de aanslibbing van de toegangsgeulen in de Beneden Zeeschelde. Het slibpercentage in het sediment op de drempels, is een afspiegeling van de slibconcentratie in de erboven gelegen waterkolom. Hoe groter de aanvoer van slib is, des te hoger ligt het slibpercentage op de drempels. De afgenomen slibvracht van de Schelde kan een verklaring zijn voor de teruggang in het slibpercentage op de drempels. Een andere oorzaak van deze afname kan in het baggeren gelegen zijn. Het fijnste sediment (slib) afkomstig van de drempels zal in de beun van het schip gedeeltelijk in suspensie blijven. Door overvloeiverliezen kan dit slib weer terugstromen naar het estuarium. Omdat de slibconcentratie in de waterkolom geen dalende trend vertoont in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens, wijzen we de afname in het slibgehalte op de drempels toe aan de baggerwerkzaamheden. Om uit te kunnen maken of deze bijdrage een significant invloed kan hebben op de aanslibbing van de toegangsgeulen, maken we een simpel rekensommetje. We nemen aan dat het slibpercentage op alle drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde met 2% is afgenomen tussen '91 en '97. Dit komt neer op 0.33% per jaar. Deze afname van het slibpercentage in de drempels, kan als maat gebruikt worden voor de hoeveelheid slib die door baggerwerkzaamheden vrijgekomen is. Het baggervolume bedraagt 7 miljoen m³ per jaar, zodat er jaarlijks maximaal ca 25 duizend m³ slib kan zijn vrijgekomen. Bij een droge dichtheid van 1.2 ton/ m³ geeft dit 30 duizend ton slib per jaar. Dit is ongeveer 5% van de hoeveelheid slib die jaarlijks uit de toegangsgeulen en havendokken in de Beneden Zeeschelde verwijderd wordt.

Op de drempels in de Beneden Zeeschelde wordt eveneens gebaggerd. De jaarlijkse baggerinspanning bedraagt 2 miljoen m³ (1991). Het slibpercentage op deze drempels ligt wat hoger dan in de Westerschelde, gemiddeld tussen de 10 à 20% (figuur 5.1). Ook op deze drempels is het slibpercentage in de periode '91-'97 afgenomen, en wel met ca. 5-10%. Uitgaande van een baggervolume van 2 miljoen m³, en een gemiddelde afname van het slibpercentage over de periode '91-'97 van 20% naar 10%, kan ont-slibbing van de drempels als gevolg van baggerwerkzaamheden op de drempels jaarlijks ca. 40 duizend ton slib leveren. Dit is minder dan 10%

van de hoeveelheid slib die elk jaar uit de toegangsgeulen en havendokken verwijderd wordt.

In hoofdstuk 4 en 5 is gesteld dat de combinatie van bodemdynamiek en slibverwijdering in de toegangsgeulen en havendokken verantwoordelijk is voor de erosie van slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde. In de bovenstaande alinea's hebben we laten zien dat de baggeractiviteiten op de drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde en in de Beneden Zeeschelde zelf, zorgen voor een extra stukje "dynamiek" van de bodem. De continue verplaatsing van zand vanaf de drempels naar de scharen houdt het sediment in beweging en mobiliseert slib. Tevens is aangetoond dat de hoeveelheid slib die in suspensie kan geraken als gevolg van baggerwerken, slechts een fractie is van de hoeveelheid slib die jaarlijks verwijderd wordt uit de toegangsgeul naar de Kallosluis en uit de havendokken achter de Zandvlietsluis. Omdat de drempels jaarlijks gebaggerd worden, hebben we hier te maken met slib dat recent is aangevoerd en betreft het geen slib dat afkomstig is uit oude afzettingen. Er is daarom geen reden aan te nemen dat de slibkwaliteit in het estuarium negatief beïnvloed wordt door de baggeractiviteiten op de drempels. Wellicht dat bij verdieping van de drempels deze oude afzettingen wel aangeboord kunnen worden. De natuurlijke dynamiek van de bodem speelt een grotere rol dan de "kunstmatige dynamiek" veroorzaakt door baggeren. Het gebied in de Beneden Zeeschelde dat onderhevig is aan ontslibbing zal groter moeten zijn dan het totaal aan drempels.

5.8.2. Schorerosie in het oostelijk deel van de Westerschelde

In paragraaf 2.4 is al aangegeven dat een aantal schorren in het oostelijk deel van de Westerschelde te kampen heeft met erosie. Deze erosie vindt plaats langs de randen van het schor en wordt in verband gebracht met het steiler worden van de geulwanden ter plaatse. Gezien het hoge percentage slib in het schorsediment kan schorerosie een leverancier zijn van een significante hoeveelheid slib. Afgaande op [De Jong, 1998] wordt een inschatting gemaakt van de hoeveelheid slib die jaarlijks door schorerosie aan het watersysteem bijgedragen kan worden.

De schorren in het in het oostelijk deel van de Westerschelde die aan erosie onderhevig zijn, worden in de volgende tabel opgesomd.

Tabel 5.4: Erosie van schorren in het oostelijk deel van de Westerschelde

	Teruggang (m/j)	Lengte (km)	Hoogte (m)	Percentage slib %	Volume slib (10^3 m^3)
Schor van Waarde	5	2	1	50	5
Land van Saeftinge	1	10	1	50	5
Schor van Bath	2	4	0,5	50	5

De getallen die in bovenstaande tabel zijn gebruikt zijn maximale schattingen. In het totaal mag daarom uitgegaan worden van een maximale jaarlijkse bijdrage van slib afkomstig van schorerosie die in de orde van 10 duizend m^3 ligt. Wanneer we een droge dichtheid van 1.5 ton/m^3 hanteren komt dit neer op een massa van ca. 15 duizend ton, hetgeen ca. 5% is van de hoeveelheid die in de balans uit figuur 4.2 vermeld staat als afkomstig uit de bodem. Bovendien komt een deel van dit slib op het schor terecht en is er sprake van opslibbing (ca. 1 cm per jaar) van begroeid gebied langs de oevers. Het moge duidelijk zijn dat de schorren in het oostelijk deel van de Westerschelde maar een kleine factor kunnen zijn in de slibbalans van de Beneden Zeeschelde.

Uit monsternamen is gebleken dat in de bovenste halve meter van het Land van Saeftinge het sediment maximaal klasse 2 heeft. In diepere delen van het schor is de kwaliteit beter. Wanneer de kwaliteit van het sediment op Saeftinge representatief is voor de andere schorren, kan schorerosie niet de oorzaak van de gesignaleerde kwaliteitsachteruitgang in het gebied tussen de grens en Hansweert geweest zijn.

5.8.3 De slikken bij Waarde

Voor het schor van Waarde ligt een groot slikgebied, de slikken van Waarde. De slikken zijn sterk gegroeid in de jaren zeventig. Vanaf het midden van de jaren tachtig is er echter een omslag opgetreden en zijn de slikken gaan eroderen. Het slikcomplex - met een oppervlakte van ca. 100 ha - is een meter verlaagd. Uitgaande van een slibpercentage van ca. 15-20% komt dit neer op een erosie van ongeveer 150-200 duizend ton slib, 10 duizend ton per jaar. Deze hoeveelheid slib is vrijgekomen in een periode van 15 jaar en is vergeleken met wat in het Antwerpse havengebied jaarlijks gebaggerd wordt niet schokkend. Omdat het slik gevormd is in de jaren zeventig zou erosie van het slik wel gevolgen voor de waterkwaliteit kunnen hebben. Het relatief vuile slib dat gesedimenteerd is in de jaren zeventig komt nu weer in het watersysteem. De verwachting is echter dat, gelet op de kwantiteit, de waterkwaliteit maar in beperkte mate door erosie van de slikken bij Waarde beïnvloed kan zijn.

5.8.4 Verbreding van het Kanaal van Zuid-Beveland

Aan het eind van de jaren tachtig is een begin gemaakt met het verbreden van het Kanaal van Zuid-Beveland. In twee etappes zijn in 1988 en 1990 de kanaal wanden afgegraven en is de bodem verdiept. Tussen april en december 1990 is in het totaal 1,6 miljoen m³ sediment gestort in het gebied tussen de platen van Valkenisse en het vasteland van Zuid-Beveland. In 1988 ging het om een vergelijkbare hoeveelheid. Het sediment bestond grotendeels uit veen en klei.

De stortlocatie was zodanig gekozen dat er veel sedimentatie plaatsvond, met name in de Zimmermangeul. Het volume van deze geul beneden NAP -2m, is in de jaren negentig voortdurend afgenomen. Verspreiding van dit sediment zal daarom maar beperkt plaatsvinden. De exacte hoeveelheden zijn niet bekend. Gelet op de aard van het sediment, zijn effecten op de waterkwaliteit onwaarschijnlijk.

5.8.5 Andere mogelijkheden

In '96 is een start gemaakt met de aanleg van een nieuwe containerkaai ten noorden van de Zandvliet sluis. Hierbij is een schor deels afgegraven. Het slib afkomstig van dit schor is in het watersysteem terecht gekomen. Welke hoeveelheid slib het betreft en wat de kwaliteit van het materiaal is, is niet bekend.

Bij de berging van scheepswrakken ten behoeve van de verdieping van de vaargeul in het Schelde estuarium, is ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens de drempel lokaal tot een diepte van 27 meter afgegraven. Hierbij kunnen ook oude slibafzettingen aangeboord zijn. Ook hier ontbreken verdere gegevens.

Al met al kan niet uitgesloten worden dat slib afkomstig van schor- en slikerosie en eventueel baggerwerkzaamheden een bijdrage levert aan de aanslibbing van de toegangsgeulen naar de Antwerpse havendokken. De gesignaleerde achteruitgang van de waterkwaliteit op het traject Hansweert tot aan de Belgisch-Nederlandse grens in de periode '87-'96

moet echter een ander verklaring hebben. De meest voor de hand liggende blijft erosie van oud slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde

6 Validatie van de opgestelde slibbalans aan de hand veldgegevens

In het vorige hoofdstuk zijn de veldgegevens op een rijtje gezet. Per dataset is onderzocht of er in de periode vanaf 1987 tot heden significante veranderingen opgetreden zijn en zo ja, wat de oorzaak van de veranderingen is geweest. In deze paragraaf zullen we de bevindingen uit de veldgegevens samenvatten en onderzoeken of de afzonderlijke conclusies consistent zijn. Daarna zal bekeken worden of het tot nu toe geschetste beeld van de effecten van de slibverwijdering aanpassing behoeft en eventueel verbeterd kan worden.

6.1 Bevindingen uit de veldgegevens

6.1.1. Het beeld op basis van baggercijfers en de slibbalans

Het beeld dat in hoofdstuk 4 uit de baggercijfers en de slibbalans ontstaan is omtrent de gevolgen van de slibverwijdering op de slibhuishouding is het volgende: een grote hoeveelheid slib sedimenteert jaarlijks in de toegangsgeulen tot de zeesluizen in de Beneden Zeeschelde. Vanuit de toegangsgeul naar de Kallosluis wordt een grote hoeveelheid slib definitief uit het systeem verwijderd en op land opgeslagen. De hoeveelheid slib die via de Schelde en vanaf zee naar de Beneden Zeeschelde wordt aangevoerd is veel kleiner dan er jaarlijks uit het systeem verwijderd wordt. Daarbij komt nog dat de aanvoer van slib via de Schelde de laatste jaren sterk afgenomen is. Het slib dat sedimenteert in de toegangsgeulen moet derhalve afkomstig zijn uit de Beneden Zeeschelde zelf en wel uit de bodem. De slibvoorraad in de bodem wordt steeds kleiner en steeds ouder slib zal uit de bodem geërodeerd worden. Ook hiervan zal een deel in de toegangsgeulen tot de zeesluizen sedimenteren en worden verwijderd. Het restant zal samen met de fijnste slibfractie afkomstig vanaf de Schelde naar de Westerschelde getransporteerd worden. Vanwege de hydrodynamische condities zal slechts een klein percentage (ca. 10 tot 20%) van het slib afkomstig uit de Beneden Zeeschelde verder geraken dan Hansweert en uiteindelijk de Noordzee bereiken.

Tot op heden heeft de slibverwijdering de grootte van het transport van fluviatiel slib naar de Westerschelde maar weinig beïnvloed. De getijstroaming zorgt voor transport naar de Westerschelde, net als voordat slibverwijdering plaatsvond. Door de afgenomen aanvoer van slib vanaf de Schelde, is dit transport in absolute zin wel iets afgenomen. Zolang er slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde aanwezig is, komt dit door omwoeling gedeeltelijk in de Westerschelde terecht. Naar mate de bodemvoorraad afneemt, wordt dit transport steeds kleiner.

Slibverwijdering uit de toegangsgeulen leidt tot ontslibbing van de bodem van de Beneden Zeeschelde. Op termijn zal het transport van fluviatiel slib naar de Westerschelde bepaald worden door de aanvoer van "vers" slib vanaf de Schelde.

6.1.2 Het beeld op basis van veldgegevens

Uit paragraaf 5.1 volgt dat het slibpercentage ($<63\mu\text{m}$) op de drempels tussen Valkenisse en Krankeloon in de periode '90-'97 met ca. 50% is afgenomen tot gemiddeld ca. 7%. Deze afname wordt ook in het lutumgehalte ($<2\mu\text{m}$) aangetroffen. In de toegangsgeulen tot de zeesluizen in de Beneden Zeeschelde is de afname (ca. 10%) relatief gezien een stuk klei-

ner. Wanneer de ontwikkeling op drempels in de Beneden Zeeschelde representatief is voor de totale bodem, is de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde in de periode dat slibverwijdering heeft plaatsgevonden sterk afgenomen.

In paragraaf 5.3 is over de periode '89-'97 uit de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding in het zwevend stof bij Schaar van Ouden Doel geen duidelijke trend waar te nemen. Dit duidt erop dat het percentage slib met een mariene herkomst min of meer gelijk is gebleven. Zowel de slibverwijdering als de lagere aanvoer van slib vanaf de Schelde lijken het percentage fluviatiel slib ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens niet te reduceren. Dit is merkwaardig en kan duiden op aanvoer van fluviatiel slib van elders. De voornaamste kandidaat is de bodem van de Beneden Zeeschelde.

Bij het vertalen van de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verhouding in het slib naar percentages marien en fluviatiel slib, is de aanname dat de hoeveelheid koolstof zich conservatief gedraagt. Bij veroudering van het slib in de bodem wordt het organisch materiaal echter afgebroken. Hierbij breekt ^{12}C eerder af dan ^{13}C waardoor de verhouding $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ verandert (diagenese). Het slib krijgt door deze afbraak steeds meer een fluviatiel karakter. Erosie van oud slib - dat toch al een relatief hoog percentage fluviatiel slib bevat - kan door verandering van de verhouding $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ door afbraak zorgen voor een schijnbare vermindering van het aandeel marien slib in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens.

Tijdens de SAWES tochten van '87-'88 was het percentage slib afkomstig van zee over het algemeen hoger dan het percentage zeewater ter plaatse. Uit paragraaf 5.4 valt op te maken dat bij de SAWES '95-'96 tochten het percentage zeeslib gedaald is en erg veel lijkt op het percentage zeewater. Het zeeslib lijkt minder te sedimenteren en permanent in suspensie te zijn. Het zeeslib kan een fijnere korrelgrootte hebben gekregen, maar een verklaring hiervoor ontbreekt. Een logischere verklaring is wederom de erosie van oud slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde waardoor slib met hogere gehalten contaminanten vrijgekomen is. Uit deze hogere gehalten wordt een hoger percentage fluviatiel slib afgeleid waardoor het aandeel marien slib gedaald lijkt te zijn. In paragraaf 7.1 komen we nog terug op de chemie van de bodem.

De sterke gradiënt in de samenstelling van het bodem sediment die in paragraaf 5.5 gesignaleerd wordt, duidt op een sterke sedimentatie van zowel fluviatiel als marien slib in de toegangseulen tot de zeeluisen in de Beneden Zeeschelde. Stroomopwaarts van de Kallosluis vinden we nauwelijks marien slib in het sediment en stroomafwaarts van de Zandvliet sluisen is de sedimentatie van fluviatiel slib gering.

Vergelijking van de SAWES tochten in '87-'88 en '95-'96 in paragraaf 5.6, maakt duidelijk dat er o.a. in de Beneden Zeeschelde een vergroving van het zwevend stof opgetreden is. De slibfractie met een korrelgrootte $<2\mu\text{m}$ is afgenomen van ca. 60% naar 40%, ten gunste van de fractie $2-53\mu\text{m}$. Het percentage slib in het zwevend stof is min of meer gelijk gebleven. Een oorzaak van de vergroving is de aanleg van rioolzuiveringsinstallaties in Vlaanderen en de afname van de aanvoer van slib vanaf de Schelde in het algemeen. Daarnaast kan ook de slibverwijdering uit de toegangseulen verantwoordelijk zijn voor een deel van de vergroving. Het slib uit de toegangseulen is relatief fijn. Verwijdering van dit slib zal ook aan het wateroppervlak waarop de korrelgrootte analyse betrekking heeft zichtbaar zijn.

De kwaliteitsgegevens uit paragraaf 5.7 ondersteunen het beeld dat tot nu toe gevormd is. Erosie van oud slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde zorgt voor een toename van gehalten spoormetalen en organische microverontreinigingen in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens. De periode waarover deze hogere gehalten merkbaar zullen zijn wordt bepaald door de resterende voorraad oud slib in de bodem. Naast bepaling van de grootte van de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde is het van belang de gehalten in het slib te meten.

6.1.3 Consequenties voor de slibbalans

Het beeld dat in paragraaf 6.1.1 geschetst werd wat betreft de transportprocessen van slib in de Beneden Zeeschelde blijft na analyse van de veldgegevens goed overeind. De enige verrassing die uit de veldgegevens naar voren komt, is de afname van het percentage marien slib in het zwevend stof ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens. De verklaring die voor dit fenomeen gegeven wordt in paragraaf 6.1.2 is echter plausibel. Een iets groter transport van fluviatiel slib vanuit de Beneden Zeeschelde richting Westerschelde dan tot nu toe werd aangenomen (paragraaf 4.4) is daarmee te rechtvaardigen. Dit is in overeenstemming met de ontwikkeling van de waterkwaliteit. Het transport van oud slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde is tot nu toe niet in de slibbalans verdisconteerd.

Voor de slibbalans betekent dit dat we het transport van fluviatiel slib over de Belgisch-Nederlandse grens verhogen van 73 tot 100 duizend ton per jaar. Het transport van marien slib naar de Beneden Zeeschelde is sluitpost in de slibbalans. In de balans van paragraaf 4.4 is dit transport iets aan de lage kant vergeleken met de periode '64-'86. Ook dient de verhouding tussen de fracties marien en fluviatiel slib op een realistische waarde gehandhaafd te blijven. We besluiten daarom het transport van marien slib naar de Beneden Zeeschelde zodanig te verhogen, tot 80 duizend ton per jaar, dat de verhouding tussen de beide slibfracties op de Belgisch-Nederlandse grens ongewijzigd blijft ten opzichte van de balans uit paragraaf 4.4. Het beeld dat zo ontstaat is gegeven in tabel 6.1.

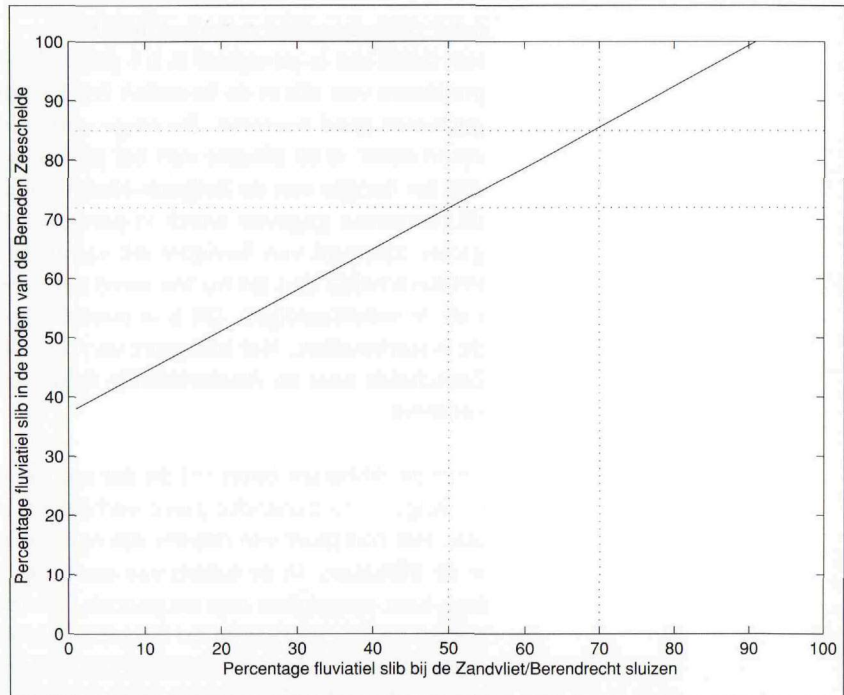
Tabel 6.1: Slibbalans bij een gewijzigd transport van fluviatiel en marien slib over de Belgisch-Nederlandse grens.

Fluviatiel	Aanvoer vanaf de Schelde	200	Marien		
	Aanvoer zijdelings	20			
	Export grens	100		Import vanuit Westerschelde	80
Fluviatiel+ Marien	Afvoer Zandvliet	200			
	Afvoer Kallo	300			
Sluitpost	Onttrekking bodem	321			

Wanneer we nu het percentage fluviatiel slib ter hoogte van de Kallo sluis ongewijzigd laten, ontstaat er een vergelijking met twee onbekenden: de fractie fluviatiel slib bij de Zandvliet/Berendrecht sluis en in de bodem van de Beneden Zeeschelde. De oplossing van deze vergelijking is dus niet uniek. In figuur 6.1 wordt het verband tussen de beide onbekenden geschetst. Het percentage fluviatiel slib bij de Zandvliet sluis ligt tussen de 50-70 % (in zwevend stof op de grens 56%). Hieruit volgt dat het percentage fluviatiel slib in de bodem tussen de 72-85% ligt. Dit is een zeer realistisch bereik. Uit figuur 5.10 volgt dat bij een gemiddeld rivierdebiet, het

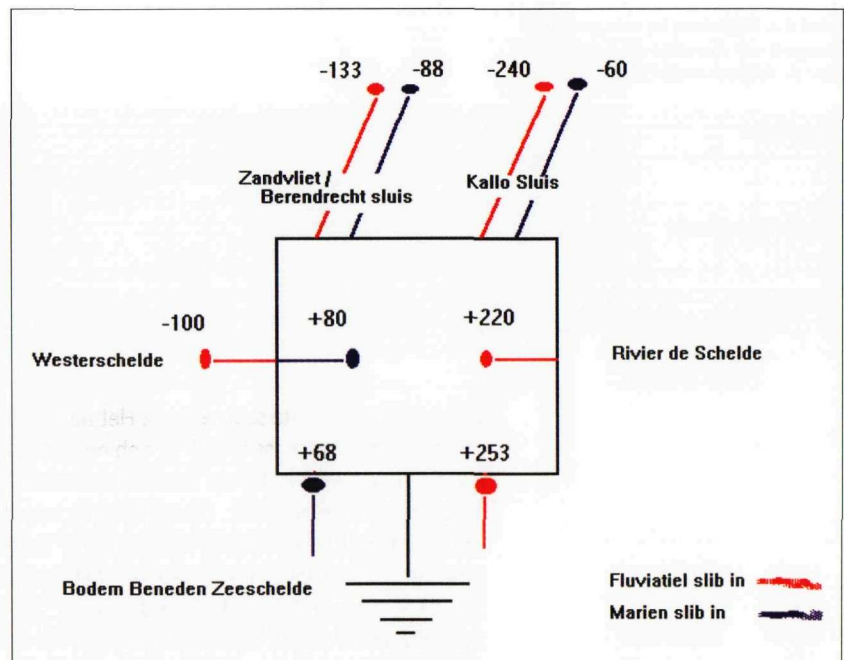
percentage fluviatiel slib ter hoogte van de Zandvliet sluis rond de 60% ligt. Voor de bodem volgt uit figuur 6.1 dan een waarde van 78%. Deze waarde ligt in het bereik dat door [Verlaan, 1997d] gegeven wordt. De bodem wordt in deze beschouwing als een geheel genomen. In werkelijkheid zal de fractie fluviatiel slib in de bodem fluctueren met de lokatie in de Beneden Zeeschelde. De waarde van 78% wordt stroomopwaarts van Lillo waargenomen.

Figuur 6.1: Verband tussen het percentage fluviatiel slib ter hoogte van de Zandvliet sluis en in de bodem van de Beneden Zeeschelde.



De uiteindelijke balans voor zowel het fluviatiel als het marien slib is weer gegeven in figuur 6.2.

Figuur 6.2: Slibbalans uit figuur 4.2 aangepast op basis van de veldgegevens uit hoofdstuk 5 (duizend ton per jaar).



6.2 Modelleren van effecten van slibverwijdering

In de natuur is het moeilijk het effect van slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde op het slibtransport van en naar de Westerschelde te isoleren van andere veranderingen die hebben plaatsgevonden in het systeem. Hetgeen in het veld gemeten wordt is het resultaat van een complex van factoren. Graag zouden we de gewijzigde omgang met baggerspecie willen implementeren en overige factoren ongemoeid laten. Numerieke modellen bieden in principe deze mogelijkheid.

In een drietal rapporten [Salden, 1997a & b; Salden & Yang, 1996] is de opzet en het gebruik van een slib-transportmodel voor het Schelde estuarium beschreven. Het model geeft ruimtelijk gedetailleerde informatie maar houdt slechts rekening met een beperkt aantal transportprocessen. Slib wordt met het water aangevoerd vanaf de Schelde en vanuit zee. Bij afname van de stroomsnelheid bezinkt het slib en komt het op de bodem terecht. Wanneer de stroming weer aantrekt kan het slib weer opgewerveld worden. Het model is in staat gebleken de transportrichting en -snelheid van het slib in het estuarium uitstekend weer te geven [Salden, 1997a]. De grootste beperking van het model is dat de bodemprocessen op elementaire wijze gemodelleerd zijn. Het vrijkomen van slib uit de bodemvoorraad als gevolg van de dynamiek van de bodem is geen modelproces. In werkelijkheid is het een essentieel onderdeel van de slibbalans. Het is daarom niet het streven het effect van slibverwijdering met het model exact te voorspellen, maar we gebruiken het model als hulpmiddel om het globaal effect van een lokale ingreep te onderzoeken. Centraal staat een vergelijking van modelberekeningen met en zonder slibverwijdering onder verder exact gelijke omstandigheden.

In [Salden, 1997a] wordt het modelresultaat voor de situatie zonder slibverwijdering gepresenteerd. De slibbalans uit [Van Maldegem, 1993] heeft als verificatie materiaal gefungeerd. In [Salden, 1997b] wordt het resultaat met slibverwijdering gegeven. De voornaamste bevindingen uit de twee modelberekeningen zijn de volgende:

- De aanvoer van slib vanuit zee op de modelrand bij Vlissingen en vanaf de rivier de Schelde bij Rupelmonde worden door de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde niet beïnvloed. De jaarlijkse aanvoer van slib naar het estuarium blijft gelijk.
- Het transport van fluviatiel slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde in de modelberekening is als gevolg van de slibverwijdering verwaarloosbaar klein geworden. In werkelijkheid wordt de fijnste slibfractie als spoeltransport naar de Westerschelde afgevoerd. Het slib in het model heeft echter een gemiddelde korrelgrootte.
- Het netto transport van marien slib richting de Beneden Zeeschelde neemt toe door de aanwezigheid van de toegangsgeulen naar de havendokken in de Beneden Zeeschelde. In deze toegangsgeulen zijn de omstandigheden gunstig voor sedimentatie van het slib. Een grote hoeveelheid slib wordt in de omgeving van de geulen gedurende het getij heen en weer getransporteerd en zal uiteindelijk op een locatie met kalm water de gelegenheid krijgen om te sedimenteren. Het netto transport is niet zo groot terwijl de bruto transporten tijdens eb en vloed aanzienlijk zijn. Door de aanleg van de toegangsgeulen naar de sluizen is er een groot gebied met relatief lage stroomsnelheden extra gecreëerd, waardoor de sedimentatie zal toenemen. Een groter deel van het slib dat tijdens vloed over de Belgisch-Nederlandse grens getransporteerd wordt zal tijdens kentering uit kunnen zakken en in de ebfase van het getij achterblijven in de Beneden Zeeschelde. Het bruto transport in de ebfase van het getij neemt af waardoor het netto transport

van marien slib richting de Beneden Zeeschelde toeneemt. Het model berekent een verdubbeling van het netto transport van marien slib naar de Beneden Zeeschelde. Het percentage van de slibimport vanuit de Noordzee naar de Westerschelde dat uiteindelijk de Beneden Zeeschelde bereikt is toegenomen van 25% tot ruim 45%. Het effect van extra sedimentatie in de toegangsgeulen is merkbaar in het gebied dat maximaal een getij-weglengthe van de Zandvliet en Berendrecht sluisen verwijderd is (Hansweert) en zal leiden tot een afname van de sedimentatie in de Westerschelde. Benadrukt wordt dat niet de slibverwijdering maar de aanleg van de havendokken en toegangsgeulen naar de zeesluizen verantwoordelijk is voor het toegenomen transport van marien slib naar de Beneden Zeeschelde.

- Het model berekent een sterke afname in de troebelheid over een groot deel van het estuarium. De grootste afname treedt op stroomopwaarts van Hansweert. Deze afname in concentratie kan gezien worden als het effect van de toegangsgeulen en havens in de Beneden Zeeschelde op het nieuw aangevoerde slib. De oorzaak van deze sterke concentratie afname die door het model berekend wordt is gelegen in het feit dat erosie van slib uit de bodem niet gemodelleerd wordt. Deze sterke concentratie afname wordt in de praktijk niet waargenomen. Al eerder is opgemerkt dat erosie van slib uit de bodem een belangrijke compenserende factor voor het verlies van slib door slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde is. Deze erosie kan in het gehele estuarium op treden en kan de troebelheid op peil houden.

Het model heeft ons inzicht verschaft in het effect dat de slibverwijdering heeft op het transport van marien slib. De toename van het transport van marien slib naar de Beneden Zeeschelde en de omvang van het gebied waarover het transport van marien slib beïnvloed wordt in het model, is goed te verklaren, maar is aan de hand van veldgegevens moeilijk vast te stellen. De toename van het transport van marien slib naar de Beneden Zeeschelde beïnvloed de verhouding tussen de mariene en fluviatiele slibfracties in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens. Deze verhouding wordt dus niet alleen door variatie in aanvoer van fluviatiele slib vanaf de Schelde bepaald. Hiermee is rekening gehouden bij interpretatie van de veldgegevens die in hoofdstuk 5 aan de orde zijn gekomen.

Het transport van fluviatiele slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde wordt in grote mate bepaald door de bodemprocessen in de Beneden Zeeschelde. Bij afwezigheid van de processen in het model, wordt de grootte van het transport van fluviatiele slib minder goed weergegeven.

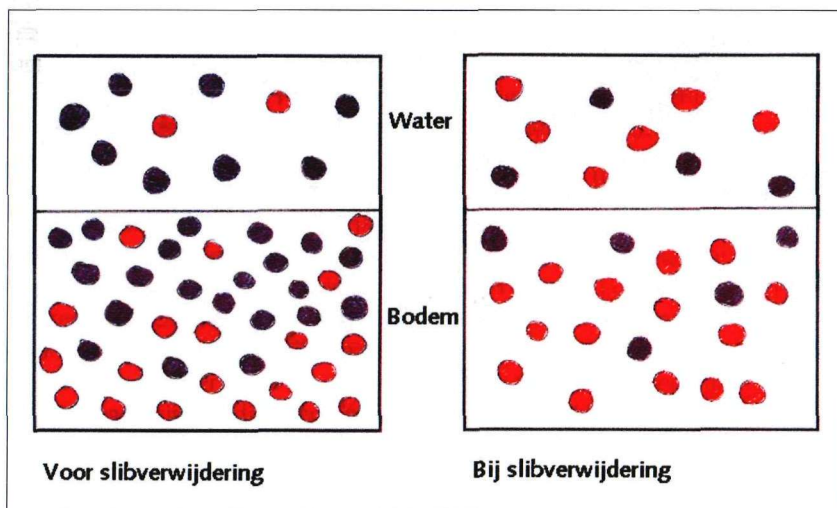
7. Consequenties voor de waterkwaliteit

7.1 Ontwikkeling in waterkwaliteit in relatie tot de slibverwijdering

De aanvoer van slib vanaf de rivier de Schelde naar het estuarium is vanaf de jaren negentig gestaag aan het afnemen (zie figuur 3.3). Door reductie van emissies aan de bronnen in het Schelde stroomgebied, is de chemische kwaliteit van dit slib het afgelopen decennium toegenomen. Ook in de Beneden Zeeschelde zijn de bronnen van vervuiling aangepakt en is de uitstoot afgenomen. Een van de weinige "bronnen" die ongemoeid is gebleven is de bodem van het estuarium zelf, waarin in de loop der jaren verschillende contaminanten gehecht aan slib opgeslagen zijn. In paragraaf 4.6.1. is aandacht besteed aan de mechanismen die verantwoordelijk kunnen zijn voor het vrijkomen van deze stoffen uit de waterbodem.

Naast chemische processen kan ook slibverwijdering bijdragen aan het vrijkomen van stoffen (zware metalen) middels erosie van vroeger afgezet slib uit diepere delen van de bodem. Uit de slibbalans blijkt dat de bodem van de Beneden Zeeschelde als gevolg van de slibverwijdering veel slib is kwijt geraakt. Naar mate de verwijdering verder gaat wordt meer oud slib gemobiliseerd en uitgewisseld met de waterfase. Uitwisseling van slib tussen bodem en waterfase op zichzelf wordt niet veroorzaakt door de slibverwijdering. De netto erosie van slib uit de bodem die momenteel plaatsvindt, zorgt echter voor een versnelling van de uitwisseling en een toename van het aandeel relatief oud slib. Gezien de hogere gehalten aan contaminanten in dit materiaal, kan met dit mechanisme de gesignaleerde achteruitgang van de waterkwaliteit tussen de grens en Hansweert verklaard worden (zie paragraaf 5.7). Een en ander wordt schematisch weergegeven in figuur 7.1.

Figuur 7.1: Uitwisseling van slib tussen bodem en waterfase voor en na slibverwijdering. De rode bolletjes staan voor oud slib, de blauwe voor relatief jong slib.



Slibverwijdering heeft eerst het relatief jong slib uit het bovenste gedeelte van de bodem verwijderd en is nu toegekomen aan het oudere materiaal. Er wordt zo meer oud materiaal uitgewisseld met de waterfase. Wanneer de gehalten in het bodemsediment niet door processen als oxidatie en uitwisseling via poriënwater verlaagd worden, zal slibverwijdering nog gerui-

me tijd de kwaliteit van het zwevend stof in de omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens kunnen beïnvloeden

Uit factoranalyse (paragraaf 5.4) en modelberekeningen (paragraaf 6.2) volgt dat fluviatiel slib maar in zeer beperkte mate verder dan Hansweert getransporteerd wordt. Bij bestudering van de hydrodynamica in dit gebied [Salden en Yang, 1996] is naar voren gekomen dat ten hoogste van Hansweert de stroming aan de bodem getijgemiddeld richting Beneden Zeeschelde wijst. Het slib dat uit de bodem van de Beneden Zeeschelde is geërodeerd, is relatief grof en zal gezien de stroming aan de bodem niet voorbij Hansweert getransporteerd worden. Het gebied waarin tussen '87 en '95 een toename van onder andere de gehalten spoormetalen optreedt, ligt binnen een getij-weglength van de Belgisch-Nederlandse grens, een extra aanwijzing voor het feit dat oud slib afkomstig uit de Beneden Zeeschelde verantwoordelijk is voor de hogere gehalten in het zwevend stof op dit traject. Alleen het heel fijn slib zal als spoeltransport met het rivierwater richting zee afgevoerd worden. Dit is echter niet uit de bodem afkomstig.

Tenslotte willen we opmerken dat de relatie tussen emissies, gehalten en slibtransport, iets ingewikkelder is dan op het eerste oog lijkt. De slibvracht via de Schelde is in de jaren negentig sterk afgenomen. Door ingebruikname van waterzuiveringsinstallaties is vooral het organisch huishoudelijk slib aangepakt. In de periode '87-'96 is een vergroving van het zwevend stof geconstateerd ten koste van de fractie $< 2\mu\text{m}$ (een adsorbant van spoormetalen). Het gecombineerd effect van een kleinere slibvracht met een lager organisch stof gehalte en een vergroving van het zwevend stof kan geleid hebben tot hogere metaalgehalten in het zwevend stof bij gelijk gebleven of zelfs afgenomen emissies.

7.2 Verschillen in de slibbalans als indicatie voor ontwikkelingen in de waterkwaliteit

De verwijdering van slib uit de Beneden Zeeschelde heeft ten doel het transport van fluviatiel slib afkomstig van de Schelde naar de Westerschelde te verminderen. Uit vergelijking van de slibbalansen in paragraaf 4.5 is gebleken dat het transport van fluviatiel slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde inderdaad is afgenomen maar dat dit voornamelijk het gevolg is geweest van de afname in de slibvracht van de Schelde. De slibverwijdering heeft gevolgen voor de bodem van de Beneden Zeeschelde. Effectief verdwijnt er slib uit de bodem. Dit komt niet doordat er meer slib erodeert, maar omdat het elders (toegangsgeulen) sedimenteert. De slibverwijdering leidt daarmee niet tot een extra bron van slib in de Beneden Zeeschelde maar zorgt er wel voor dat er een andere soort slib (ouder) in suspensie komt. Het gecombineerd effect van de lagere slibvracht van de Schelde en de mindere kwaliteit van het geërodeerde slib uit de bodem, zet zich voort naar de Westerschelde.

In de slibbalans over de periode '92-'96 (zie figuur 6.2) is aangenomen dat jaarlijks een derde deel van het slib aangevoerd door de Schelde naar de Westerschelde getransporteerd wordt (73 duizend ton). Daarnaast wordt er 27 duizend ton slib afkomstig uit de bodem van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde getransporteerd. Het totaal transport bedraagt aldus 100 duizend ton per jaar.

Wanneer we dit model toepassen op de slibbalans over de periode '64-'86 bedraagt de hoeveelheid slib die direct vanaf de Schelde naar de

Westerschelde afgevoerd worden een derde deel van 375 duizend ton, i.e. 125 duizend ton per jaar. Dit betekent dat de resterende 50 duizend ton materiaal moet zijn dat met de bodem uitgewisseld is. Al aangegeven is dat slibverwijdering zelf geen invloed heeft op de grootte van de bruto erosie van slib uit de bodem. Een deel van het slib dat vroeger vanuit de bodem van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde werd afgevoerd verdwijnt nu naar de toegangsgeulen en wordt van daaruit alsnog verwijderd. Het is daarmee aannemelijk gemaakt dat het transport tussen de bodem van de Beneden Zeeschelde en de Westerschelde afgenomen is van 50 duizend naar ca. 27 duizend ton per jaar. Omdat momenteel ouder materiaal uit de bodem vrij komt zal de vuilvracht naar verwachting een ander beeld geven.

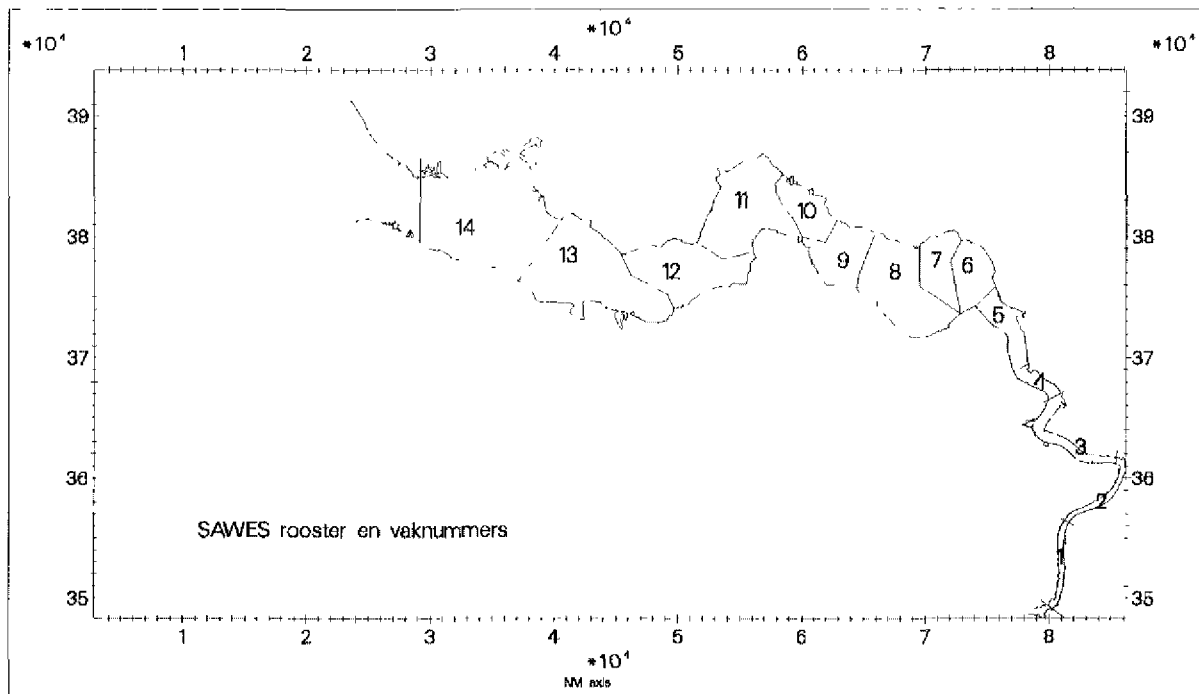
Het totale transport van fluviatiel slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde bedraagt momenteel ca. 100 duizend ton, hetgeen ongeveer 45% van de Schelde aanvoer is. In de periode '64-'86 lag dit op 175 duizend ton, wat neerkwam op ongeveer 47%.

De verbetering van de slibkwaliteit wordt aldus veroorzaakt door afname van de emissies en een toegenomen zuiveringscapaciteit in het stroomgebied van de Schelde. Slibverwijdering leidt op korte termijn tot een transport van minder maar vuiler slib vanuit de bodem van de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde. Het gecombineerd effect van schonere Schelde slib en vuiler bodemslib is momenteel nog negatief voor de kwaliteit van het slib dat naar de Westerschelde afgevoerd wordt. Op termijn zal slibverwijdering echter de kwaliteit ten goede komen. Sanering op deze wijze van de waterbodem in het Schelde stroomgebied heeft echter slechts nut wanneer het hand in hand gaat met verdere emissiereducties vanuit industrie en huishoudens.

7.3 Berekeningen met het BOS LIFE model op basis van de geconstrueerde balansen

In paragraaf 2.5 is aangegeven dat een groot aantal contaminanten zich bij voorkeur hecht aan het organisch materiaal in het slib en slechts in beperkte mate in opgeloste vorm voorkomt. De transportpaden van deze stoffen zullen in grote lijnen dezelfde zijn als dat van slib. Om beleidsvoorbereidende en beleidsevaluerende studies uit te kunnen voeren, is in de jaren tachtig een model ontwikkeld waarin de effecten van het beleid op het terrein van de waterkwaliteit getoetst kunnen worden aan de doelstellingen. Het rekenrooster van het model wordt het SAWES rooster genoemd en bestaat uit 14 vakken die corresponderen met morfologische eenheden. Het SAWES rooster is weergegeven in figuur 7.2.

Figuur 7.2 Het rekenrooster van het SAWES model



We willen nu dit model gebruiken om de effecten van de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde op de waterkwaliteit in het Schelde estuarium te berekenen. De slibbalansen die eerder bepaald zijn voor de periodes '64-'86 (paragraaf 4.3) en '92-'95 (paragraaf 6.1) worden gebruikt om het transport van slib in het model vast te leggen. Deze balansen beperken zich echter tot de Beneden Zeeschelde. Om de doorvertaling van de effecten van slibverwijdering naar de Westerschelde te kunnen maken hebben we de balansen uitgebreid tot de Westerschelde. De aannames hierbij zijn dat de import van marien slib vanaf zee ongewijzigd is gebleven in de loop der jaren en jaarlijks 300 duizend ton bedraagt en dat 10% van het fluviatiele slib afkomstig van de Schelde de Noordzee bereikt. Het transport van slib in het gebied tussen de Belgisch-Nederlandse grens en de Noordzee kent een geleidelijk verloop.

De balansen zijn bepaald op het SAWES model rooster, wat zoveel wil zeggen dat de uitwisseling van slib tussen aangrenzende modelvakken is berekend. Uitwisseling met de bodem vindt wel plaats, in de zin dat het de grootte van het transport kan beïnvloeden, maar er wordt geen ander slib toegevoegd. Daarnaast zijn de gehalten van het bodemslib een onbekende factor. Het vrijkomen van oud afgezet slib uit de bodem wordt dus niet weergegeven. Het grootste essentiële verschil tussen de balansen van voor en na de slibverwijdering wordt niet door het model in beschouwing genomen. De consequentie hiervan is dat het model resultaten genereert die bepaald worden door de grootte van de slibaanvoer via de rivier de Schelde en niet door verschillen in kwaliteit van het slib. Om het model te kunnen gebruiken voor scenario berekeningen waarbij bodemsanering een rol speelt, dient het aangepast te worden. Omdat deze aanpassing niet voor afloop van deze studie gerealiseerd kan worden, kan het model niet ingezet worden voor de vertaling van effecten in de slibbalans naar de waterkwaliteit van de Westerschelde.

8. Consequenties voor de ecologie

8.1 Troebelheid

De troebelheid in het estuarium wordt bepaald door de grootte van het slib aanbod en door de condities die het slib in suspensie brengen. We gaan er van uit dat deze laatste factor over de periode '92-'97 niet gewijzigd is. Wat resteert is de hoeveelheid beschikbaar slib. Deze wordt op de korte termijn bepaald door de aan- en afvoer in het estuarium en op de iets langere tijdschaal door de voorraad slib in de bodem van het estuarium.

Uit de slibbalansen over de periodes '64-'86 en '92-'96 blijkt dat de aanvoer van slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde de laatste jaren flink is afgenomen. Een belangrijke reden hiervan is echter de afgenomen slibvracht van de rivier de Schelde.

Van het slib dat door de Schelde aangevoerd wordt, gaat ca. een derde deel op transport naar de Westerschelde. Voordat slibverwijdering plaatsvond was dit ook het geval. De rest van het slib dat werd aangevoerd sedimenteerde grotendeels in de Beneden Zeeschelde of net over de grens op het Land van Saeftinge. De getijstroming zorgde ervoor dat het troebelingsmaximum heen en weer bewoog door de Beneden Zeeschelde. Het Land van Saeftinge dat over het algemeen binnen een getijweglengte van de lokatie van het troebelingsmaximum gelegen is kon hierdoor een deel van dit slib invangen.

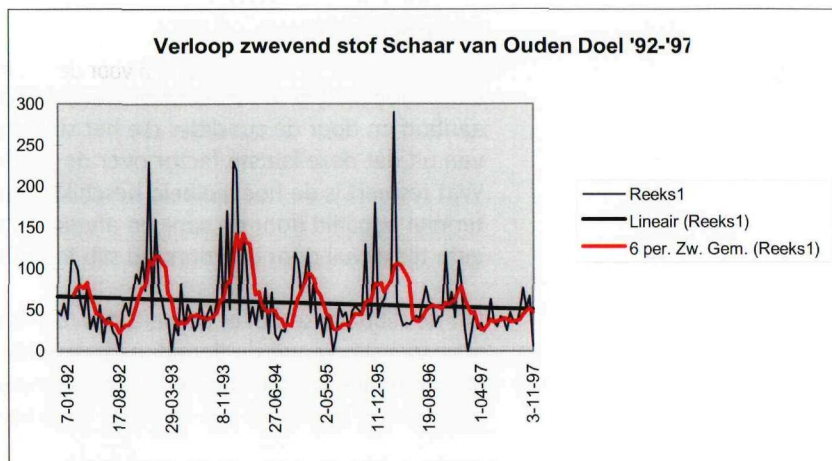
Slibverwijdering zorgt voor een afname van de hoeveelheid slib dat rondgepompt wordt in het troebelingsmaximum, omdat een deel vanuit de toegangseulen verwijderd wordt. Hierdoor kan de aanslibbing van het Land van Saeftinge wat minder worden.

Vergeleken met de periode '64-'86 is in de periode '92-'96 het transport van slib vanuit de Beneden Zeeschelde naar de Westerschelde afgenomen van 175 naar 100 duizend ton per jaar, het gecombineerd effect van aanvoervermindering en eventueel slibverwijdering. Een deel hiervan verdwijnt uiteindelijk naar de Noordzee. Omdat deze hoeveelheid ook afgenomen is, schatten we dat de hoeveelheid slib die achterblijft in de Westerschelde met ca. 50 duizend ton per jaar is afgenomen. In vijf jaar tijd komt dit neer op een afname van de netto aanvoer van ca. 250 duizend ton. Dit komt ongeveer overeen met de hoeveelheid slib die momentaan in suspensie is in het estuarium (gemiddelde concentratie van 75 mg/l). Het is echter nog niet 1% van de geschatte voorraad slib in de bodem van de Westerschelde [Van Maldegem et al., 1993b].

In paragraaf 4.6.2 hebben we enige aandacht besteed aan het effect op de troebelheid in de Westerschelde van een vermindering van de aanvoer van slib vanuit de Beneden Zeeschelde. De conclusie was dat met het oog op de bodemvoorraad een afname van het slibtransport geruime tijd gecompenseerd kan worden door erosie van slib uit de bodem van het systeem. Gezien de dynamiek van de bodem en de tijdschaal waarop uitwisseling met de bodemvoorraad plaatsvindt, is de verwachting dat het effect van de verminderde aanvoer van slib snel gecompenseerd wordt door erosie van slib uit de bodem van de Westerschelde. De effecten op de troebelheid blij-

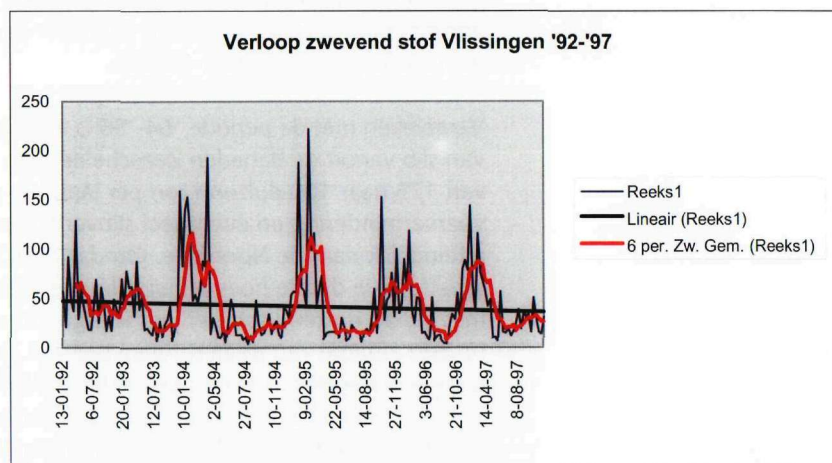
ven daarom voorlopig klein en zullen naar verwachting in het niet vallen bij de natuurlijke variabiliteit in concentratie als gevolg van meteorologie en seizoenvariaties. Ter illustratie wordt in figuur 8.1 het verloop van de slibconcentratie aan het wateroppervlak bij Schaar van Ouden Doel getoond voor de periode '92-'97.

Figuur 8.1: Verloop van de zwevend stof concentratie aan het wateroppervlak bij Schaar van Ouden Doel in de periode '92-'97.



In deze figuur is het seizoenseffect goed zichtbaar en zorgen "events" voor uitschieters in concentratie. Er lijkt een licht dalende trend in concentratie aanwezig. Hieruit moet echter niet te snel de conclusie getrokken worden dat dit door de afname van slibaanvoer vanaf de Schelde wordt veroorzaakt. In figuur 8.2 is dezelfde licht dalende trend waar te nemen ter hoogte van Vlissingen. Het lijkt er eerder op dat de periode die weergegeven wordt te kort is voor bepaling van een trend als gevolg van de afgenomen Schelde vracht.

Figuur 8.2: Verloop van de zwevend stof concentratie aan het wateroppervlak bij Vlissingen in de periode '92-'97.



Al laatste is geconstateerd dat door slibverwijdering de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde aanmerkelijk afgenomen moet zijn en dat dit ook gevolgen moet hebben voor het zwevend stof gehalte. We beschikken echter alleen over gegevens van het zwevend stof gehalte aan het wateroppervlak. Hier wordt nu juist het minste effect verwacht omdat het fijne materiaal dat hier aanwezig is maar in beperkte mate door de slibverwijdering beïnvloed wordt. Gegevens op een andere positie in de waterkolom zijn niet in voldoende mate aanwezig.

8.2 Slikken & schorren

De aangroei van slikken en schorren vindt plaats doordat water met een zekere slibconcentratie een deel van dit slib tijdens hoogwaterkentering achterlaat. Er bestaat dus een verband tussen de aangroei snelheid en de slibconcentratie in het water. Vooralsnog zijn er geen aanwijzingen dat slibverwijdering een noemenswaardig effect heeft op de slibconcentratie in de Westerschelde, zodat ook de aangroei van slikken en schorren ongemoeid gelaten zal blijven. Een uitzondering moet gemaakt worden voor de schorren in de onmiddellijke nabijheid van de Belgisch-Nederlandse grens (Land van Saeftinge, schor van Bath) die gezien de getij-weglengte enigszins beïnvloed kunnen worden door een afname van de slibconcentratie in het troebelingsmaximum.

9. Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

In dit rapport is een beeld geschetst van de effecten van slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde op de slibhuishouding en zijn de consequenties van de gewijzigde slibhuishouding voor de waterkwaliteit en de ecologie aan bod gekomen. Slibverwijdering is echter niet de enige maatregel geweest die de afgelopen jaren gevolgen heeft gehad voor de ontwikkeling van de waterkwaliteit in het estuarium. Emissie reducties van contaminanten en sanering van de waterbodem in het stroomgebied van de Schelde, hebben eveneens hun steentje bijgedragen. De conclusies die uit voorgaande hoofdstukken getrokken kunnen worden zijn in twee categorieën verdeeld: effecten van "autonome ontwikkelingen" en effecten van slibverwijdering.

Autonome ontwikkelingen

1. Door de afname van de slibvracht van de rivier de Schelde is het transport van fluviatiel slib naar de Westerschelde in de periode '92-'96 afgenomen.
2. Emissie reducties van onder andere spoormetalen en organische microverontreinigingen in het Schelde stroomgebied hebben de waterkwaliteit in de Beneden Zeeschelde en Westerschelde het afgelopen decennium gunstig beïnvloed.
3. De baggeractiviteiten op de drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde en in de Beneden Zeeschelde zijn, naast de microdynamiek in de bodem, verantwoordelijk voor de uitwisseling van slib tussen bodem en water. De hoeveelheid slib die per jaar bij baggerwerkzaamheden op de drempels vrij kan komen, is maximaal 15% van de hoeveelheid slib die jaarlijks uit toegangseulen en sluiscomplexen in de Beneden Zeeschelde verwijderd wordt. De resterende 85% is afkomstig uit de Westerschelde, van de rivier de Schelde en van erosie van slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde als gevolg van slibverwijdering.

Slibverwijdering

4. Slibverwijdering heeft maar in beperkte mate effect op de grootte van het transport van fluviatiel slib naar de Westerschelde. Alleen het allerfijnste sediment wordt (permanent) in suspensie naar de Westerschelde afgevoerd. De iets grovere slibfractie sedimenteerde voorheen in de Beneden Zeeschelde of in de directe omgeving van de Belgisch-Nederlandse grens (o.a. Land van Saeftinge). Omdat toch ook fijn slib in de toegangseulen naar de zeesluizen aangetroffen wordt, is enig effect van slibverwijdering op het grensoverschrijdend fluviatiel transport waarschijnlijk. De afname van de slibvracht van de rivier de Schelde legt in dit verband echter meer gewicht in de schaal.
5. Voordat er sprake was van slibverwijdering (periode '64-'86), groeide de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde jaarlijks met ca.

0.1 miljoen ton [Bastin, 1993]. Deze aangroei is het netto effect geweest van erosie en sedimentatie van slib in de bodem. De slibverwijdering heeft in eerste instantie geen gevolgen voor hoeveelheid slib die uit de bodem erodeert. De sedimentatie concentreert zich echter in de toegangsgeulen naar de zeesluizen. Vanuit deze toegangsgeulen wordt het slib definitief uit het systeem verwijderd waardoor de sedimentatie in de bodem als geheel effectief afneemt. Als gevolg van de slibverwijdering is de voorraad slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde momenteel aan het afnemen.

6. In de periode '92-'96 is vanuit de toegangsgeul naar de Kallosluis en vanuit de sluiscomplexen van Zandvliet en Berendrecht ca. 2.5 miljoen ton slib verwijderd. Deze hoeveelheid is ruim tweemaal zo groot als wat in deze periode aan slib naar de Beneden Zeeschelde wordt aangevoerd via de rivier de Schelde, vanuit de Noordzee en eventueel vanaf de drempels. Het verschil tussen de hoeveelheid slib die is verwijderd en de hoeveelheid die vanaf de Schelde en vanuit de Westerschelde is aangevoerd, is afkomstig uit de bodem van de gehele Beneden Zeeschelde. In de periode '92-'96 is de bodem van de Beneden Zeeschelde ca. 1.5 miljoen ton aan slib kwijtgeraakt.
7. Slibverwijdering zorgt voor een netto erosie van slib uit de bodem van de Beneden Zeeschelde, waardoor de uitwisseling van oud slib tussen bodem en waterfase versterkt wordt. De netto erosie van slib uit de bodem, die momenteel plaatsvindt, heeft tot gevolg dat er steeds meer slib dat in het verleden is afgezet in de waterfase terecht komt. Voorheen werd dit slib grotendeels afgedekt door een "verse toplaag", nu zorgt slibverwijdering voor een netto erosie van slib uit de bodem waardoor de uitwisseling van oud slib tussen bodem en waterfase versneld wordt. Op deze wijze leidt slibverwijdering uit de toegangsgeulen naar de zeesluizen en uit de havendokken tot een sanering van de waterbodem van de Beneden Zeeschelde. Een deel van het slib dat uit de bodem erodeert, blijft in suspensie en wordt naar de Westerschelde getransporteerd.
8. Slibverwijdering leidt op het traject tussen Hansweert en de Belgisch-Nederlandse grens, tot hogere gehalten spoormetalen en organische microverontreinigingen in het zwevend stof dan op basis van de emissie reductie in het Schelde stroomgebied en ontwikkelingen bovenstrooms van Antwerpen verwacht mogen worden. De termijn waarover deze hogere gehalten merkbaar zullen zijn, wordt bepaald door de gehalten in het resterende slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde en de omvang van de voorraad oud slib. Uitgaande van een significant hogere vervuilingsgraad van het slib dat afgezet is in de jaren zestig en zeventig en een netto sedimentatie in deze periode van 0.1 miljoen ton per jaar [Bastin, 1993], wordt de voorraad "vervuild" slib in de bodem van de Beneden Zeeschelde op ca. twee miljoen ton geschat. Wanneer er in de periode '92-'96 slechts oud slib geërodeerd is, bedraagt de voorraad oud slib momenteel nog minder dan één miljoen ton. Dit is echter een ondergrens.
9. De voornaamste fysische parameters voor het ecosysteem van de Westerschelde zijn troebelheid, slibgehalte in de bodem en sedimentatiesnelheid van slikken en schorren. De slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde lijkt weinig gevolgen te hebben voor de troebelheid in de Westerschelde. Ook het effect van de afgenomen slibvrucht van de rivier de Schelde kan momenteel niet aangetoond worden. De slibvoor-

raad in de bodem van het estuarium kan een afname van de slibaanvoer geruime tijd compenseren. Natuurlijke variaties in slibconcentratie als gevolg van meteorologie en seizoenseffecten zijn vele malen groter dan wat slibverwijdering op middellange termijn teweeg kan brengen. Er bestaat een verband tussen de sedimentatie snelheid van schorren en de slibconcentratie. Hoe lager de concentratie, des te kleiner de sedimentatie. Een complicerende factor is dat bij eventueel afnemende schorhoogte de inundatie frequentie en golfwerking weer zal toenemen. Vanwege de geringe effecten van slibverwijdering op de slibconcentratie, lijken gevolgen voor schorvorming uitgesloten te mogen worden.

9.2 Aanbevelingen ten aanzien van de jaarlijkse slibbalans van de Afdeling Maritieme Schelde

Jaarlijks wordt door de AMS een overzicht gegeven van de geschatte hoeveelheid slib die met het Scheidewater wordt aangevoerd naar de Beneden Zeeschelde en van de omvang van de baggeractiviteiten in het Antwerps havengebied. Deze gegevens worden verwerkt tot een slibbalans van de Beneden Zeeschelde. De huidige balans is echter meer een overzicht van een aantal balansposten dan een volledige balans, in die zin dat de posten niet sluitend zijn.

Naast informatie omtrent de slibaanvoer via de Schelde en de baggeractiviteiten ter hoogte van Kallo, wordt meestal enige aandacht besteed aan de havenbekkens gelegen achter de Zandvliet en Berendrecht sluizen. De gedachte is dat een deel van het slib dat in de toegangsgeulen naar deze sluizen *gesedimenteerd is, tijdens het schutten via de sluizen naar de havendokken getransporteerd wordt*. Dit transport is van een grootte-orde waarmee in de slibbalans van de Beneden Zeeschelde wel degelijk rekening gehouden moet worden [Winterwerp, 1997]. De waarde die door de AMS vermeld wordt heeft echter betrekking op de hoeveelheid baggerspecie die jaarlijks uit de havenbekkens verwijderd wordt. Dit getal is alleen een maat voor het transport door de zeesluizen, wanneer het volume van het havenbekken constant is. Naar het zich laat aanzien is dit, zeker op jaarbasis, niet het geval. Voor de balans van de Beneden Zeeschelde is het daarom zaak het transport direct aan de zeesluizen te bepalen in plaats van indirect uit de baggergegevens.

Als verplichting voortkomend uit de WVO-vergunning onderhoudsbaggerwerken dient AMS gegevens te verstrekken aangaande de actuele slibvoorraad in de Beneden Zeeschelde. De slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde speelt een cruciale rol in de slibbalans. Volgens de huidige inzichten moet de bodem een groot deel van haar slibvoorraad kwijt zijn geraakt de afgelopen vijf jaar. Ter verificatie wordt in 1998 de slibvoorraad opgemeten en vergeleken met de toestand in het midden van de jaren tachtig. Dit zal gebeuren op de wijze die in [Bastin, 1993] is beschreven. De opname beperkt zich echter tot de bovenste meter van de bodem. Het is niet duidelijk of zo de sedimentlaag waaruit uitwisseling met het water plaatsvindt volledig gedekt is. Het zou beter zijn de dynamische bodemlaag geheel te bemonsteren. Tegenwoordig zijn er akoestische technieken voorhanden waarmee de dikte van deze laag bepaald kan worden. Het wordt aanbevolen bij opname van de slibvoorraad in de bodem van de Beneden Zeeschelde rekening te houden met de dikte van de dynamische laag en de slibvoorraad met zekere regelmaat te bepalen, teneinde de evolutie van de bodemsamenstelling te kunnen volgen.

Uiteindelijk ligt onze interesse bij de grootte van het transport van fluviatiel en marien slib over de Belgisch-Nederlandse grens. Het bepalen van dit transport is opgelegd als verplichting voortkomend uit de vergunning (zie paragraaf 1.2). Het is echter onmogelijk dit transport direct in het veld te bepalen. Wanneer echter de verhouding tussen de fracties fluviatiel en marien slib bekend zijn op verschillende lokaties (zowel in de bodem als in het zwevend stof), kan het transport op de grens indirect bepaald worden. Omdat onzekerheden in de balanstermen doorwerken in de sluitpost, dient een zo groot mogelijke nauwkeurigheid nagestreefd te worden. Met het oog hierop, verdient het de aanbeveling de veel gebruikte $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio bepaling in de koolstofisotopen aan een nadere inspectie te onderwerpen. Voor optimale nauwkeurigheid dient een frequente bemonstering plaats te vinden in de Beneden Zeeschelde zelf, in de toegangsgeulen tot de havendokken en in de havendokken zelf.

Literatuur overzicht

A.L. Bastin, Evaluatie van de hoeveelheid slib in de Beneden Zeeschelde, evolutie tussen 1964 en 1986. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, (1993).

W.B.M. ten Brinke, Slib in het estuarium van de Schelde: paden en lotgevallen deel 1: grootschalige (semi-)natuurlijke slibbeweging, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, werkdocument GWA0-92.841X, (1992).

J. Claessens, Beneden Zeeschelde Slibbalans 1992, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, nr AZ/93.3, (1993).

J. Claessens, Beneden Zeeschelde Slibbalans 1992, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, nr. AZ/94.2, (1994).

J. van Dalfsen, Ecologische effecten, kansen en bedreigingen van grootschalige zandwinning, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-98-???, (1998).

J. Dronkers, Tidal asymmetry and estuarine morphology, *Netherlands Journal of Sea Research* volume 20, pp. 117-131, (1986).

M. Fettweis, M. Sas, J. Monbaliu & E. Taverniers, Langdurige meting van slibconcentratie, saliniteit en temperatuur te Prosperpolder (Beneden Zeeschelde), Water nr. 92, pp. 15-26, (1997).

D. de Jong, mondelinge mededeling, (1998).

C.H.R. Help, N.K. Goosen, P.M.J. Herman, J. Kromkamp, J.J. Middelburg & K. Soetaert, Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries, *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 33, 1-149, (1995).

A.M.B. Holland & H. Smit, Zoet water in het Schelde estuarium: veranderingen in saliniteit, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, rapport DGW-93.057, (1994).

J. van de Kreeke & K. Robaczewska, Tide-induced residual transport of coarse sediment, application to the Ems estuary, *Netherlands Journal of Sea Research* volume 31(3), pp. 209-220, (1993).

W. van Leussen, Fine sediment transport under tidal action, *Geo-Marine Letters* volume 11, pp. 119-126, (1991).

D.C. van Maldegem, De slibbalans van het Schelde estuarium, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Nota GWA0-91.081, (1993a).

D.C. van Maldegem, H.P.J. Mulder & A. Langerak, A cohesive sediment balance for the Scheldt Estuary, *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 27 (2-4), p. 247-256, (1993b).

D.C. van Maldegem, Slibbalans Schelde estuarium 1995, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), werkdocument RIKZ/AB-97.839X, (1997).

L.C. Otter, Vergelijking van de Lithografische kaarten van de Zeeschelde, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/AB.96.870X, (1996)

Rijkswaterstaat Directie Zeeland, rapport AW-185246

R.M. Salden & Z. Yang, A three dimensional hydrodynamic model of the Scheldt estuary for the transport of fine sediment, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-96.143X, (1996).

R.M. Salden, Een slib-transportmodel van het Schelde estuarium ten behoeve van waterkwaliteitsmodellering, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-97.116X, (1997a).

R.M. Salden, Effecten van slibonttrekking in de Beneden Zeeschelde op de slibbalans van het Schelde estuarium: een modelstudie, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-97.136X, (1997b).

W. Salomons & W.D. Eysink, Pathways of mud and particulate trace metals from rivers to the southern North Sea. In *Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin* (Nio, S.D., Schuttenhelm, R.T.D. & Van Weering, T.C.E., eds.). Backwell, Oxford, pp 429-450, (1981).

G. Spronk, Veranderingen in slib Schelde, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/IT-98.802X, (1998).

E. Taverniers, Beneden-Zeeschelde, slibbalans 1994, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Maritieme Schelde, verslag AMS.95/02, (1995).

E. Taverniers, Beneden-Zeeschelde, slibbalans 1995, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Maritieme Schelde, verslag AMS-96 03, (1996).

E. Taverniers, Beneden-Zeeschelde, slibbalans 1996, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Maritieme Schelde, Concept verslag AMS-97 03, (1997).

S.J.P. Vereeke, Geactualiseerde slibbalans Schelde estuarium, Rijkswaterstaat Directie Zeeland, Nota AX 94.064, (1994).

P.A.J. Verlaan, S.V. Meijerink, V.J. Maartense & M. Donze, Slibtransport in de Schelde over de Belgisch-Nederlandse grens, *H₂O* (30) nr. 8, (1997a).

P.A.J. Verlaan, Vrachten van zware metalen naar de Noordzee vanuit de Schelde - een nieuwe schatting -, ingediend bij *H₂O*, (1997b)

P.A.J. Verlaan, M. Donze & P. Kuik, Marine versus fluvial suspended matter in the Scheldt estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46, pp. 873-883, (1997c).

P.A.J. Verlaan, Marine versus fluvial bottom sediment in the Scheldt estuary, submitted to *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (1997d).

G. Verliefde, W. Nielandt & W. Vanthienen, Haven van Antwerpen, slibbals 1989-1993, (1994).

J. Vroon, C. Storm & J. Coosen, Westerschelde, stram of struis ?, Eindrapport van het project Oostwest, Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rapport RIKZ-97.023, (1997).

S. Wartel, E. Keppens, P. Nielsen, F. Dehairs, P. van Winkel & L. Cornand, Bepaling van de verhouding marien en fluviatiel sediment, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, (1993).

De Water, Nieuwsbrief over integraal waterbeheer, Schone Schelde schone taak, nr. 27, (1995).

De Water, Nieuwsbrief over integraal waterbeheer, Kersvers milieubeleidsplan, nr. 43, (1997).

The Wetlands, Effecten van veranderingen in de slibconcentratie en het slibgehalte in de Westerschelde, (1997).

J.C. Winterwerp, Transport via zeesluizen; Zandvlietsluis en Berendrechtsluis, Waterloopkundig Laboratorium Delft Z2320, (1997).

J.J.G. Zwolsman & G.T.M. van Eck, Dissolved and particulate trace metal geochemistry in the Scheldt estuary, S.W. Netherlands (water column and sediments), *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 27 (2-4), p. 287-300, (1993).

J.J.G. Zwolsman, G.T.M. van Eck & G. Burger, Spatial and Temporal distribution of trace metals in sediments from the Scheldt estuary, south-west Netherlands, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, P. 55-79, (1996).

